



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**Prototipado de una maqueta modular de un
edificio multidireccional.**

Autor:

Villanueva González, Javier

Tutores:

Lorenzana Ibán, Antolín

Foces Mediavilla, Antonio

Departamento:

**Construcciones Arquitectónicas, Ingeniería del Terreno,
Mecánica de los medios Continuos y Teoría de Estructuras**

Valladolid, Julio 2019

Resumen

Este trabajo abarca la concepción, prototipado, caracterización y modelado computacional de dos módulos a escala que simulan plantas multidireccionales de edificios. El objetivo es poder disponer en el laboratorio de estructuras de múltiples maquetas con esas características. Para la caracterización se lleva a cabo un análisis modal de ambos módulos y de la configuración de la maqueta con el módulo superior montado sobre el inferior. Se emplean sensores de aceleración y fuerza y el software Dewesoft X3. Una vez hecho dicho estudio, se modela la estructura en CATIA y se ajustan distintos parámetros para que tras un análisis modal se consigan resultados similares a los experimentales. Finalmente, se comparan los resultados obtenidos computacionalmente con los ensayados en la estructura física, llegando así a unas conclusiones, que serán de gran importancia para futuras aplicaciones de la maqueta en diversos ámbitos docentes.

Palabras clave

Maqueta, Modular, Prototipado, Identificación, Modelado.

ÍNDICE

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.1.1. Estructura situada en el departamento.....	1
1.1.2. Prototipos existentes en otras universidades	2
1.1.3. Fuentes externas	4
1.2. Motivación	4
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivos técnicos.....	5
1.3.2. Objetivos complementarios.....	5
1.3.2.2. Parámetros vibratorios característicos.....	6
1.3.2.3. Plazos	6
1.3.2.4. Montaje	6
1.3.2.5. Disponibilidad de materiales.....	6
1.4. Organización	7
2. Prototipado	9
2.1. Condiciones de diseño. Requisitos.....	9
2.1.1. Mesa sísmica	9
2.1.2. Estructura modular del laboratorio de estructuras	9
2.1.3. Comportamiento.....	10
2.2. Desarrollo del proceso de prototipado estructural.....	10
2.2.1. Idea inicial	10
2.2.2. Desarrollo de la idea inicial	11
2.2.3. Diseño final.....	17
2.4.4. Modelado tridimensional por software.....	20
3. Identificación	27
3.1. Set-Up experimental	27
3.2. Software empleado.....	32
3.3. Resultados.....	35
3.3.1. Módulos simples.....	36
3.3.2. Conjunto de módulos.....	38
4. Simulación computacional	41
4.1. Validación de software	41
4.1.1. Modelado.....	41
4.1.2. Calculo analítico	50

4.1.3. Comparación de resultados.....	53
4.2. Composiciones ensayadas	53
4.2.1. Modelado.....	54
4.2.2. Análisis.....	59
4.2.3. Resultados.....	67
4.3. Otras composiciones.	72
4.3.1. Conjunto de módulos.....	72
4.3.2. Pilar extra en uno de los lados	75
4.3.3. Pilar central extra.....	77
4.3.4. Arriostramiento en uno de los lados.....	79
5. Conclusiones y líneas futuras.....	83
5.1. Conclusiones	83
5.1.1. Cumplimiento de objetivos técnicos.....	83
5.1.2. Cumplimiento de objetivos complementarios.	85
5.2. Líneas futuras.....	85
Referencias	87
Anexos	89
Planos	89

FIGURAS

Figura 1. Módulos de la estructura de referencia.....	1
Figura 2. Unión entre pletina, lámina y placa de metacrilato.....	2
Figura 3. Unión entre forjados.....	2
Figura 4. Estructura con pilares de nailon.....	3
Figura 5. Estructura con pilares de lámina de aluminio.....	3
Figura 6. Módulos estructurales de referencia.....	4
Figura 7. Mesa sísmica.....	9
Figura 8. Insertos roscados.....	11
Figura 9. Opciones para el forjado. a) "Honeycomb". b) Panel Sándwich con núcleo de polietileno.....	11
Figura 10. Varillas de nailon roscadas.....	12
Figura 11. Conector Lego.....	13
Figura 12. Banda perforada.....	14
Figura 13. Broches de tornillo.....	14
Figura 14. Prueba de montaje de la unión.....	15
Figura 15. Prueba de montaje del módulo.....	15
Figura 16. Detalle del ensayo del módulo.....	16
Figura 17. Tuerca de vaso de ensayo del módulo.....	16
Figura 18. Estructura final.....	17
Figura 19. Unión entre módulos.....	19
Figura 20. Tuercas de vaso.....	19
Figura 21. Sketch del forjado.....	21
Figura 22. Propiedades del taladro.....	21
Figura 23. Patrón rectangular de taladros.....	22
Figura 24. Modelo del forjado.....	23
Figura 25. Modelos de los componentes de la estructura.....	24
Figura 26. Despiece de la estructura. a) Módulo. b) Completa.....	25
Figura 27. Célula de carga.....	28
Figura 28. Acelerómetro.....	28
Figura 29. Sistema de recolección de datos Sirius.....	29
Figura 30. Soporte del acelerómetro.....	30
Figura 31. Acelerómetros posicionados.....	30
Figura 32. Disposición acelerómetros.....	31
Figura 33. Set-Up del equipo de medición.....	32
Figura 34. Interfaz gráfica principal.....	34
Figura 35. Panel de canales.....	34
Figura 36. FRF simple.....	35
Figura 37. FRF comparada.....	36
Figura 38. Modos propios del módulo 500.....	37
Figura 39. Modos propios del módulo 750.....	37
Figura 40. Modos propios del conjunto de módulos.....	39
Figura 41. Parámetros de la línea.....	41
Figura 42. Módulo de análisis.....	42
Figura 43. Mallado de una dimensión.....	42
Figura 44. Propiedades del mallado en una dimensión.....	43
Figura 45. Restricciones del modelo.....	43

Figura 46. Frecuencias propias de la viga biapoyada.	44
Figura 47. Polilínea del modelo biempotrado por simetría.	45
Figura 48. Propiedades de la viga biempotrada simplificada por simetría.	46
Figura 49. Navegación entre elementos coincidentes.	47
Figura 50. Empotramiento móvil del modelo biempotrado con simetría.	47
Figura 51. Masa concentrada en el extremo.	48
Figura 52. Modelo viga biempotrada reducida por simetría.	48
Figura 53. Frecuencias propias. a) Modelo con masa de la viga despreciable. b) Modelo sin masa adicional. c) Modelo con ambas masas.	49
Figura 54. Boceto de la viga biempotrada reducida por simetría.	51
Figura 55. Divergencia de nodos.	54
Figura 56. Concurrencia de nodos.	54
Figura 57. Boceto de las superficies.	55
Figura 58. Superficies.	55
Figura 59. Plano auxiliar del módulo 500.	55
Figura 60. Forjados del módulo 500.	55
Figura 61. Creación de la varilla.	56
Figura 62. Modelo de los módulos simples. a) 500. b) 750.	57
Figura 63. Plano auxiliar secundario.	58
Figura 64. Forjados del conjunto de módulos.	59
Figura 65. Modelo del conjunto de módulos.	59
Figura 66. Mallado. a) superficies. b) líneas.	60
Figura 67. Propiedades del forjado base.	61
Figura 68. Propiedades de los pilares.	62
Figura 69. Empotramiento del forjado base.	62
Figura 70. Fijación de las masas en el modelo.	63
Figura 71. Error Catia.	63
Figura 72. Panel de propiedades de la unión.	64
Figura 73. Modelo para el análisis. a) Módulo 500. b) Módulo 750.	65
Figura 74. Espesor del forjado intermedio.	66
Figura 75. Modelo del conjunto de módulos (750 + 500).	66
Figura 76. Frecuencias propias del módulo 500.	68
Figura 77. Modos propios del módulo 500.	68
Figura 78. Frecuencias propias del módulo 750.	69
Figura 79. Modos propios del módulo 750.	69
Figura 80. Frecuencias propias del conjunto de módulos (750+500).	70
Figura 81. Modos propios del conjunto de módulos (750+500).	71
Figura 82. Conjunto de módulos (500+ 750). a) Modelo. b) Análisis.	72
Figura 83. Frecuencias propias del conjunto de módulos (500 +750).	73
Figura 84. Modos propios del conjunto de módulos (750 +500).	74
Figura 85. Columna extra. a) Modelo. b) Análisis.	75
Figura 86. Frecuencias propias del módulo con columna extra.	76
Figura 87. Modos propios del módulo con columna extra.	76
Figura 88. Columna central. a) Modelo. b) Análisis.	77
Figura 89. Frecuencias propias del módulo con columna central.	78
Figura 90. Modos propios del módulo con columna central.	78
Figura 91. Arriostramiento. a) Modelo. b) Análisis.	79
Figura 92. Frecuencias propias del módulo con arriostramiento.	80

Figura 93. Modos propios del módulo con arriostramiento.	80
---	----

TABLAS

Tabla 1. Pesos de los distintos elementos de la maqueta.	29
Tabla 2. Propiedades del acero.	50
Tabla 3. Resultados analíticos de la viga biempotrada reducida por simetría.	52
Tabla 4. Comparación de resultados de la viga biapoyada.	53
Tabla 5. Comparación de resultados de la viga biempotrada reducida por simetría.	53
Tabla 6. Propiedades del metacrilato.	60
Tabla 7. Comparación de resultados.	84

1. Introducción

1.1. Antecedentes

Para el diseño y construcción de la maqueta no se partió de cero, sino que se tuvo material e información disponible. Esto facilitó en cierta manera el inicio del proyecto, así como su desarrollo.

1.1.1. Estructura situada en el departamento

Para empezar con el prototipado de la estructura, se hizo uso del material disponible en el departamento, ya que en cursos anteriores se presentó un Trabajo de Fin de Grado de una estructura similar a la prototipada en este proyecto [1]. Pero en su caso, se trataba de una maqueta donde la finalidad era estudiar las vibraciones en una dirección, impidiendo de forma constructiva el desplazamiento del resto de direcciones. Dada dicha condición de funcionamiento, su construcción se determinó en función de ella. A pesar de esto, su realización ayudó a saber dónde podrían cometerse errores de construcción y poder así evitarlos. Esta estructura se muestra en la **Figura 1**.



Figura 1. Módulos de la estructura de referencia.

La maqueta mostrada es una estructura, con cuatro módulos intercambiables: dos de 500 mm y otros dos de 750 mm. Cada módulo está compuesto de dos forjados de metacrilato, dos láminas metálicas de aluminio y cuatro pletinas para rigidizar las cuatro uniones existentes entre los forjados y las láminas (**Figura 2**). Cada una de estas uniones cuenta con tres conjuntos de tornillo y arandela, ensamblando así pletina, lámina y forjado, gracias a los taladros que este tiene con sus roscas

Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional

correspondientes por donde se introducen los tronillos. Además en los forjados existen unos taladros transversales para la unión entre módulos, donde irán colocados unos tornillos con las tuercas y las arandelas (**Figura 3**). Por último, en la base se emplean unas patas de goma.



Figura 2. Unión entre pletina, lámina y placa de metacrilato.



Figura 3. Unión entre forjados.

1.1.2. Prototipos existentes en otras universidades

Otras fuentes de información que ayudaron a llevar a cabo el desarrollo de la maqueta, fueron los prototipos situados en la universidad de Exeter en Reino Unido. Estas maquetas fueron presentadas al profesorado del departamento de estructuras, el cual facilitó la información para la ejecución del proyecto.

La **Figura 4** presenta una de las estructuras de Exeter. En ellas se muestra un diseño similar al de este proyecto. Los forjados rectangulares son de aluminio perforado y taladrado, que cuenta con unas tuercas de nailon para la fijación de los pilares. Las columnas son también de nailon roscado que permite que estas sean ensambladas

Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional

en las piezas situadas en los forjados. Por último, gracias a los taladros que el forjado base tiene, es posible anclar la estructura, en el caso mostrado, a una mesa sísmica.

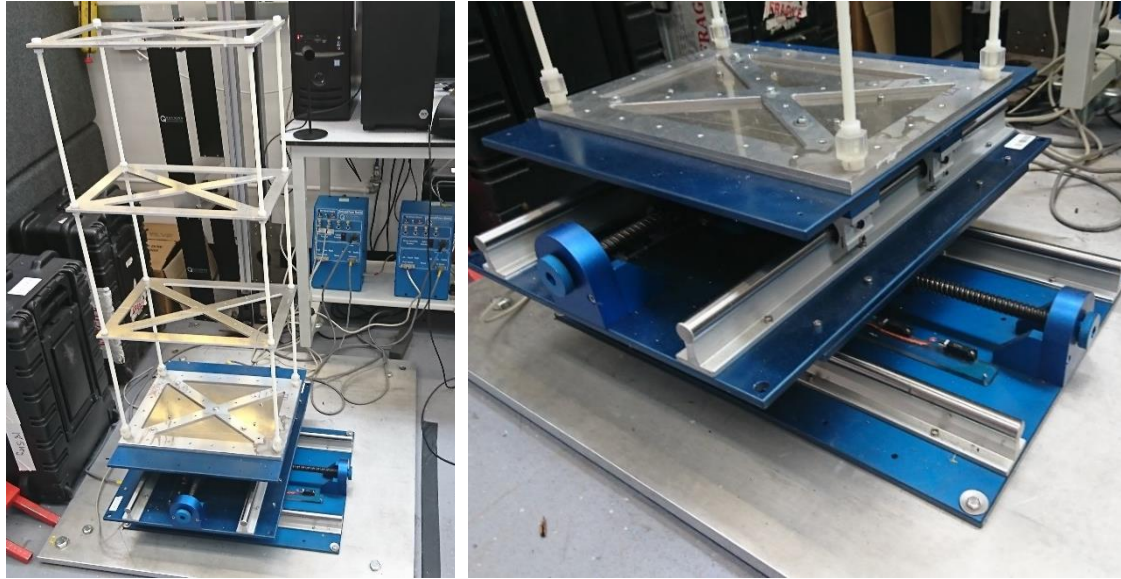


Figura 4. Estructura con pilares de nailon.

Por otro lado, aunque no se aprecie muy bien, en la **Figura 5** se muestra una estructura que mezcla la maqueta del departamento de estructuras (presentada en el apartado anterior) con la primera estructura de Exeter comentada, ya que cuenta con forjados cuadrados pero, en vez de varillas, hace uso de estrechas láminas de aluminio para la unión entre forjados.



Figura 5. Estructura con pilares de lámina de aluminio.

1.1.3. Fuentes externas

Por último, se encontraron referencias, que ayudaron a forjar la idea final, como el documento “*SHAKING TABLE DEMONSTRATION OF DYNAMIC RESPONSE OF BASE-ISOLATED BUILDINGS*” [2] de la universidad de Washington e imágenes encontradas en la búsqueda en internet (**Figura 6**).



Figura 6. Módulos estructurales de referencia.

1.2. Motivación

La necesidad de conocer cómo afectan los distintos estados de carga a las estructuras, ha sido siempre un punto fundamental a la hora de dimensionar los elementos estructurales para soportar fenómenos como los terremotos, las rachas de viento o cualquier otro motivo de excitación en las construcciones.

Este problema se ha ido incrementando con el paso de los años. Esto se debe a la variación de la composición de las estructuras, así como de sus dimensiones. Un claro ejemplo de ello son los rascacielos, cuya estructura es más esbelta de lo habitual y que, junto a los innovadores materiales usados en construcciones nuevas, llevan a una estructura mucho más flexible y sensible a las diversas excitaciones dinámicas que sufrirán con el paso del tiempo.

Los múltiples estados de carga que puede soportar una estructura hacen que sea complicado conocer la respuesta dinámica. Por ello, la experimentación con una maqueta ayuda a hacerse una idea de cómo se comporta la estructura real, teniendo en cuenta que se realizan posteriormente las mediciones correspondientes en la estructura.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivos técnicos

1.3.1.1. Maqueta

El objetivo fundamental del Trabajo de Fin de Grado consiste en poner a disposición del departamento de estructuras una maqueta a escala reducida de un edificio. Con esta maqueta se consigue así poder llevar a cabo un estudio estructural vibratorio y ver de forma aproximada cómo se comporta una estructura real ante diferentes excitaciones dinámicas.

1.3.1.2. Proceso de identificación

Otro objetivo que se busca con el desarrollo de este proyecto es el de aplicar el proceso real de caracterización de una estructura. Para ello, se utiliza la maqueta prototipada, siguiendo el procedimiento habitual llevado a cabo a la hora de identificar una estructura.

Este proceso de caracterización incluye la implementación de acelerómetros y dispositivos de medición de fuerzas externas, la configuración de un software tipo y la recolección y tratamiento de datos que conlleva.

1.3.1.3. Proceso de modelado computacional

El último de los objetivos técnicos que se busca con este Trabajo de Fin de Grado es el de aprender el proceso seguido a la hora de crear un modelo mediante el uso de un software.

Este modelado está dividido en tres partes. En primer lugar, se crea el modelo representativo de la estructura real. A continuación, se le aplica las condiciones de estudio para su análisis posterior. Por último, se entra en un proceso de calibración del modelo para que los resultados obtenidos de dicho análisis se correspondan con los obtenidos en la identificación de la estructura en la que está basada el modelo.

1.3.2. Objetivos complementarios

1.3.2.1. Presupuestos

Como es habitual en el mundo de la ingeniería, todo va sujeto a los costes de los distintos componentes o servicios necesarios para llevar a cabo un propósito determinado. Por lo que se buscan las opciones más rentables, dentro de las distintas posibilidades para elementos con un mismo fin, sin sacrificar el resto de los objetivos y requisitos del proyecto.

1.3.2.2. Parámetros vibratorios característicos

Con respecto a los parámetros, se busca dividir prácticamente la masa y la rigidez entre los elementos de la estructura, pudiéndose elegir estas de tal manera que se pueda caracterizar más fácilmente la estructura. La masa, por ejemplo, está localizada fundamentalmente en los forjados, con la posibilidad de poder agregar más masa si fuera necesario. Por otro lado, la rigidez está localizada en las columnas, que son las responsables del movimiento que sigue la estructura, así como los modos propios; esto será explicado a lo largo del proyecto.

A parte de esto se busca también que las frecuencias propias del sistema se encuentren en valores bajos, es decir, que se trate de una estructura flexible, para poder ver así fácilmente los modos en que esta se mueve, dado que los desplazamientos, ante un mismo estímulo, son mayores.

1.3.2.3. Plazos

Debido a la estimación de una fecha para la presentación de este proyecto, se ha tenido en cuenta, en todo momento, los plazos fijados desde un principio para las distintas etapas de las que consta el Trabajo de Fin de Grado. Esto es de especial importancia en los elementos constructivos, ya que algunos de ellos, al encontrarse en el extranjero, era difícil que llegaran a tiempo para la ejecución y finalización del proyecto.

1.3.2.4. Montaje

Dado que la estructura va destinada al estudio de las distintas combinaciones de módulos, se necesita que esta cuente con un ensamblaje sencillo y rápido para evitar el uso de mucha herramienta para su montaje. No solo tiene que contar con esta característica el ensamblaje, sino también el desensamblaje.

1.3.2.5. Disponibilidad de materiales

Este objetivo es de gran importancia, aunque no lo pueda parecer, ya que no todo lo planteado para la fabricación de la estructura existía o se encontraba disponible en el periodo de desarrollo. Se busca eliminar cualquier tipo de mecanizado en los elementos de la estructura. Esto se verá en detalle más adelante, dado que derivó en el rechazo de alguna de las ideas que se tenían en mente.

1.4. Organización

Este Trabajo de Fin de Grado está dividido en cinco partes. En primer lugar, después de acabar con este capítulo de introducción, se describe el prototipado de la estructura, tanto a nivel constructivo como de modelado tridimensional por software, utilizándose para ello Catia V5.

La siguiente parte del trabajo consiste en sacar las frecuencias y modos propios de vibración, utilizando para ello acelerómetros y otros elementos suplementarios, colocados convenientemente en la estructura. Para obtener los resultados y la interpretación de los movimientos de los acelerómetros se utilizará el software Dewesoft X3.

A continuación, se presenta el cálculo del comportamiento de la estructura por medio del método de elementos finitos disponible en el módulo "*Generative Structural Analysis*" de Catia, y con el que se sacaran las frecuencias y modos propios, como se hizo en el capítulo anterior.

Por último, se exponen las conclusiones y las comparaciones pertinentes entre ambas series de resultados, así como las posibles mejoras que podrían ser interesantes añadir en un futuro.

Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional

2. Prototipado

La determinación de cómo hacer la maqueta no ha sido trabajo fácil, ya que se contaba con varias opciones interesantes para la ejecución de la misma. Los trabajos ya existentes sobre el tema (tanto en la universidad como fuera de ella) han permitido contar con un mayor número de conceptos e ideas, y así no partir de cero con el proyecto.

2.1. Condiciones de diseño. Requisitos

El objetivo del proyecto, en cuanto a lo que requisitos se refiere se presenta en los puntos siguientes:

2.1.1. Mesa sísmica

Este requisito era fundamental ya que la estructura forma parte de un conjunto de Trabajos de Fin de Grado. Uno de estos trabajos es el de la mesa sísmica desarrollada en el laboratorio (Figura 7), por lo que los taladros deberían ser en todo momento compatibles con esta para poder fijar la maqueta. El objetivo de la mesa sísmica es el de simular un terremoto, como su propio nombre indica, gracias al movimiento de dos plataformas accionado por medio de husillos roscados, los cuales se mueven en dos ejes coplanarios a la base de la estructura.

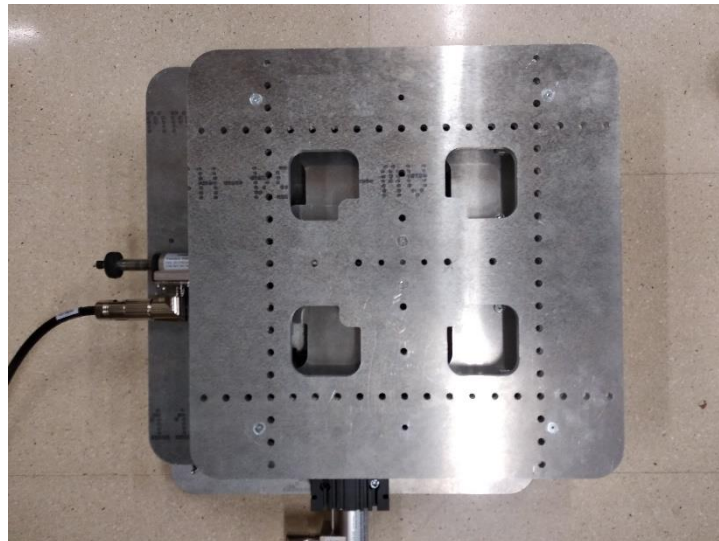


Figura 7. Mesa sísmica.

2.1.2. Estructura modular del laboratorio de estructuras

Este requisito acompaña, en cierta manera, al comentado en el apartado anterior, ya que la estructura que se debía de fabricar tendría que ser compatible con los

módulos de la estructura presente en el departamento para que sea posible, hacer todo tipo de combinaciones para futuros estudios.

Los módulos de la estructura tienen que ser similares a los de la estructura disponible. Esta similitud debe efectuarse en lo que a masa se refiere, así como también al tamaño, es decir, a la altura de dichos módulos.

2.1.3. Comportamiento

Como la estructura está destinada a la investigación/docencia, el comportamiento del que consta la maqueta es esencial. La construcción debe tener en cuenta que la estructura oscile con desplazamientos apreciables, que se puedan ver de cierta manera los modos propios en los que entra el sistema sin el uso de ningún tipo de software. Por esta razón se ha buscado un maquetado más esbelto de lo que sería la estructura de un edificio normal, para conseguir así una maqueta más flexible.

Por otro lado, se busca que la estructura sea lo más sencilla posible para facilitar todo el proceso de cálculo, caracterización, simulación y montaje, como ya se comentó en epígrafes anteriores.

2.2. Desarrollo del proceso de prototipado estructural

Como ya se dijo con anterioridad, este apartado no ha sido fácil. La idea principal se ha ido modificando y se han desechado a su vez otras ideas que por alguna razón fueron descartadas. Estas decisiones no han seguido un camino fijo, sino que se volvieron a conceptos que en principio estaban descartados y viceversa, se desestimaron ideas que se tomaron como válidas en algún momento del desarrollo del Trabajo de Fin de Grado. Parte de estas decisiones se presentan a continuación.

2.2.1. Idea inicial

Siguiendo el modelo del maquetado de la estructura existente en el departamento, la idea inicial era fabricar unos forjados de metacrilato mecanizado, de tal manera que se pudieran ensamblar todos los elementos que fueran necesarios. Este mecanizado sería lo más complejo de la idea, debido a que se necesita una elevada precisión, sobre todo en la perpendicularidad de los taladros que unen los distintos componentes de la estructura. Este problema fue el mayor inconveniente que se tuvo en la estructura expuesta en el apartado 1.1.1.

Los pilares estarían compuestos de varillas roscadas de acero de métricas seis u ocho, las cuales irían roscadas en los forjados mediante insertos roscados (**Figura 8**). Desde un principio se tuvo claro que la estructura debía ser modular, para que esta tuviera una gran variabilidad, y así conseguir una amplia gama de posibles combinaciones para su puesta en funcionamiento. La unión de los módulos sería

Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional

entre forjados, gracias a unos orificios practicados en ellos con el fin de desempeñar dicha función.

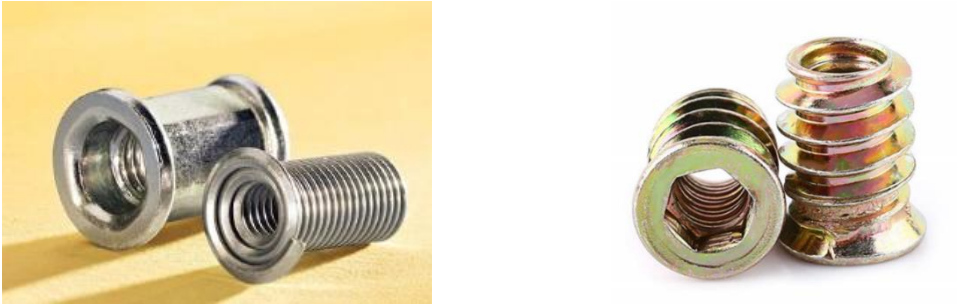


Figura 8. Insertos roscados.

2.2.2. Desarrollo de la idea inicial

Durante la exposición de este apartado se plantean las ideas más importantes dentro del prototipado de la estructura. Todas estas ideas están divididas por los elementos de los que la maqueta está compuesta.

2.2.2.1. Forjados

Debido a los amplios problemas que supone un material como el policarbonato, se barajaron diversas opciones para el remplazo de este, ya que se trata de un material muy frágil a la hora de mecanizarlo. Un ejemplo de los materiales que se barajaron para la composición de dichos forjados, son el metacrilato, el panel “Honeycomb” o el panel sándwich con núcleo de polietileno (Figura 9).

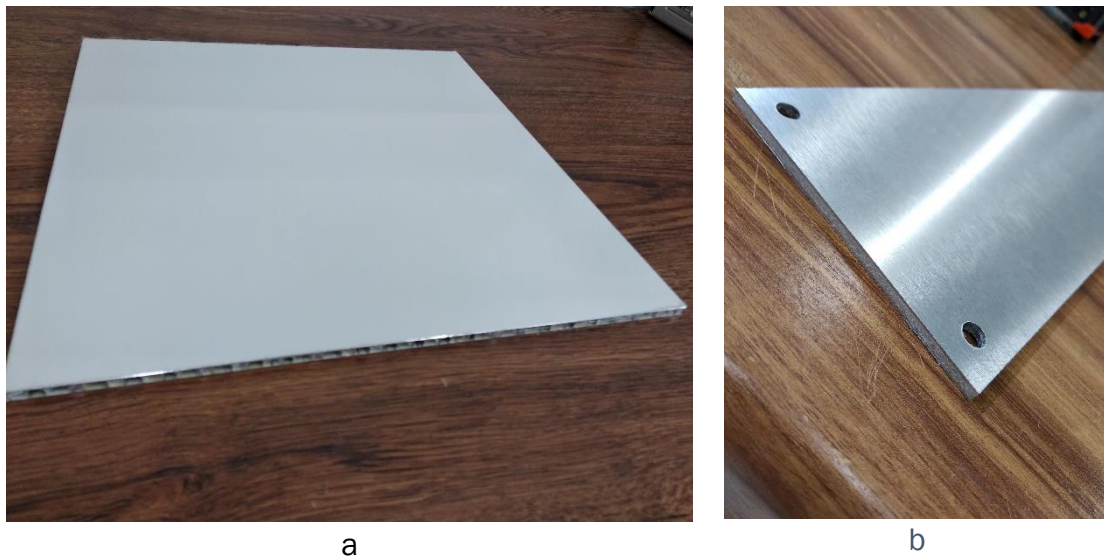


Figura 9. Opciones para el forjado. a) “Honeycomb”. b) Panel Sándwich con núcleo de polietileno.

En los meses en los que se llevó a cabo este proceso de prototipado, se llegó a un punto en el que se decidió que los forjados fuesen cuadrados, idea que se mantuvo hasta el final, consiguiéndose así una estructura simétrica. Como consecuencia de esta simetría, las posibles combinaciones para el estudio de las vibraciones disminuyen, por lo que se hizo necesario buscar una forma alternativa de hacer que el conjunto de la estructura fuera asimétrica. Esta asimetría es idónea para el requisito de variabilidad buscada en la estructura.

Tras la búsqueda de la mejor opción para el forjado, se encontró una empresa de corte por láser en Valladolid. Esta propuesta fue una apuesta muy acertada, ya que se ahorraba mucho mecanizado, y lo más importante, se aseguraba así la precisión en los cortes y orificios hechos por dicha empresa.

2.2.2.2. Pilares

Las varillas de acero roscadas son adaptables a cualquier módulo, ya que para la selección de su longitud es tan fácil como cortar el tamaño necesario para la creación de dicho módulo.

Una de las ideas descartadas es la de las varillas de nailon (**Figura 10**), como las que tenía uno de los prototipos de Exeter. El uso de esta propuesta se canceló, debido a que no se encontraron varillas de nailon roscadas lo suficientemente largas como para cubrir los requisitos propuestos. Se buscó la opción de emplear una varilla cilíndrica de nailon en la que se roscarían los extremos para que fuese igual de funcional que las varillas de acero que se iban a usar desde un principio. Pero estas varillas de nailon, que estaban disponibles en mayores tamaños, salían mucho más caras de lo que se supuso en un primer momento.



Figura 10. Varillas de nailon roscadas.

2.2.2.3. Uniones

Desde un primer momento se tomó la decisión de eliminar cualquier taladro en el canto de los forjados, en base a la experiencia adquirida en la construcción de la estructura situada en el departamento debido a que este proceso de mecanizado tenía grandes inconvenientes como consecuencia del espesor del forjado y la fragilidad del material.

La idea principal de unión entre el forjado y los pilares se desestimó, ya que requería la realización de una rosca interior en los orificios. Como solución se propuso utilizar una tuerca de vaso. Esta unión se explica detalladamente en el apartado 2.2.2.5, ya que se hizo un ensayo del comportamiento de dicha unión en el forjado.

2.2.2.4. Elementos adicionales

En algún momento del desarrollo de la maqueta se planteó la idea de implementar a la estructura piezas de Lego (**Figura 11**) o algún elemento similar. Para ello, era necesario incluir en el diseño los orificios pertinentes para su montaje, con la geometría específica que estas piezas requieren. Esta ampliación, a nivel funcional, de la estructura se desechó, dado que conllevaba una amplia problemática, tanto a nivel conceptual como de diseño, para lo que aportaría al final de proyecto.



Figura 11. Conector Lego.

Otro elemento adicional posible es al arriostramiento. La primera idea que se propuso para fabricar este componente estructural, es la de usar un trozo de banda perforada (**Figura 12**), donde un orificio está fijo en la columna, y el otro servirá para la colocación del cable o hilo, responsable de hacer la función de arriostrar la estructura. Para el tensado de estos se pensó en un tornillo que, al roscarlo, tensaría el elemento tirante. También existen en el mercado elementos tensores, pero ninguno del tamaño requerido. Un ejemplo de esto son los broches de tornillo (**Figura**

13), cuyo funcionamiento es idóneo para el arriostramiento pensado, pero su tamaño impide su implementación en este.



Figura 12. Banda perforada.



Figura 13. Broches de tornillo.

Otro posible arriostramiento es el uso de elementos como los mostrados en las imágenes del apartado 1.1.3. Pero la disponibilidad de estos elementos es muy limitada, hecho que hizo que no se encontrara nada adecuado para su implementación en la maqueta.

2.2.2.5. Ensayos

Durante el transcurso del prototipado se llevaron a cabo varias pruebas, una de ellas fue la presentada en la **Figura 14**. En ella se muestra un taladro practicado por la broca de la imagen. Este orificio es calandrado gracias a una broca de pala. De este modo, la cabeza de la tuerca de vaso queda embebida en el material, evitando el uso de un calzo para poder apilar los distintos módulos y así evitar que las cabezas de las tuercas choquen entre sí o con los propios forjados. El tornillo de la imagen hace la función de varilla roscada.

El montaje es sencillo, se introduce la tuerca de vaso en el taladro con su calandrado correspondiente, después el tornillo se enrosca en esta y gracias a la arandela y la tuerca se fija la posición de la unión. Gracias a la contratuerca se evita que la tuerca de vaso gire sobre el forjado y que el forjado quede libre en la dirección de la varilla.

Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional



Figura 14. Prueba de montaje de la unión.

Una vez hecha esta prueba se procedió a hacer otro ensayo. Este no era una prueba de la unión, sino de un módulo completo (Figura 15). La composición del módulo es similar a la utilizada en la prueba anterior.

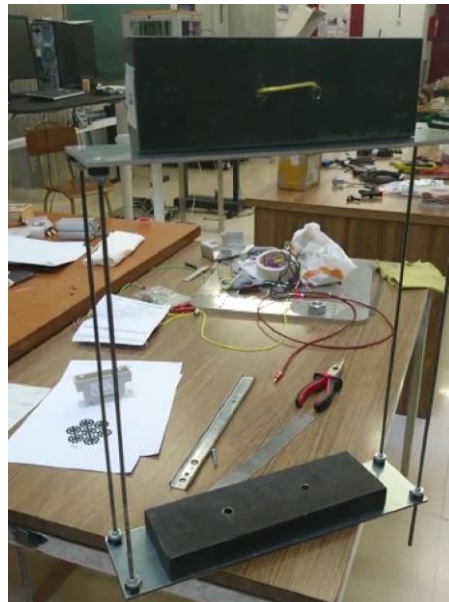


Figura 15. Prueba de montaje del módulo.

En este caso, el forjado está compuesto por material sándwich con núcleo de polietileno. Las columnas son varillas de acero roscadas de métrica cinco. Las

uniones entre forjados y pilares (**Figura 16**) cuentan con dos tuercas, dos arandelas y una tuerca de Vaso.



Figura 16. Detalle del ensayo del módulo.

La longitud del cuerpo de la tuerca de vaso (**Figura 17**) es mayor que el espesor del forjado, por lo que esta tuerca sobresale impidiendo fijar la unión. Dada esta geometría de la tuerca de vaso usada, se utiliza una arandela y una tuerca suplementarias para suplir el exceso de longitud. La fijación de los elementos se efectúa como en el ensayo anterior, es decir, haciendo uso de una arandela y una contratuerca.



Figura 17. Tuerca de vaso de ensayo del módulo.

El resultado de este ensayo sirvió para desechar la idea del panel sándwich con núcleo de polietileno como material utilizado para el forjado. Este panel sándwich se deformaba en la zona de las uniones, debido al espesor y rigidez de la placa.

2.2.3. Diseño final

Para poder continuar con el desarrollo del Trabajo de Fin de Grado, con lo que ello conlleva, se llegó a una maqueta final (**Figura 18**). Esta maqueta podría haber sido mejorada indefinidamente, sin embargo, en algún momento había que frenar dicho desarrollo para afrontar el resto de las partes de las que el proyecto está compuesto. La estructura final se planteó de tal manera que fuese lo más sencilla posible para agilizar toda la gestión de datos, su caracterización, y su diseño tridimensional por software.



Figura 18. Estructura final.

Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional

En un futuro esta estructura, como ya se ha comentado, podría mejorarse en diversos ámbitos. Esta mejora se analiza profundamente más adelante, dado que es algo que se ha tenido en cuenta durante todo el proceso de prototipado.

El conjunto final, destinado al trabajo en el laboratorio, está compuesto de dos módulos intercambiables, un módulo pequeño (500mm) y un módulo grande (750 mm). Estos a su vez, están compuestos de 2 forjados y 4 pilares. Los forjados son de metacrilato, el cual fue encargado cortar por láser. El plano de este forjado está expuesto en los anexos del trabajo. La elección del metacrilato como material para los forjados es debido a que se trata del compuesto indicado para el proceso de corte por láser, motivo por el cual la empresa trabaja con este material. Los taladros situados por toda la placa facilitan la anexión de elementos extras al forjado. Esta opción añade a la maqueta la posibilidad de montar una composición estructural asimétrica, característica que se busca para la total experimentación con la estructura.

En cuanto a las columnas, una vez desestimada la opción del nailon, se retomó la idea inicial de las varillas roscadas de acero. La unión entre el forjado y las varillas, está formada por una tuerca de vaso, una arandela y una contratuerca (**Figura 19**).

La unión entre módulos es simple, se utilizó unos tornillos junto a la tuerca de mariposa correspondiente. A la hora de la identificación, la base de la estructura fue colocada con el peso necesario para que esta no se moviera. El montaje está pensado para la unión con la mesa sísmica, como ya se dijo en su momento. La unión de dichos componentes se lleva a cabo como se hizo con la unión entre módulos.



Figura 19. Unión entre módulos.

Dada las condiciones de montaje, las cabezas de las tuercas de vaso (Figura 20) sobresalían de los forjados. Este hecho planteó un posible problema a la hora de unir los módulos. Esta unión haría que estas cabezas chocaran haciendo que los forjados no se pudieran unir de manera completa. Con ello sería necesario el uso de un calzo adecuado para la unión entre forjados y, evitar así, este choque comentado.





Figura 20. Tuercas de vaso.





Una vez llevado a cabo el montaje de la estructura, se dedujo que el uso de un calzo era innecesario, debido a que el espesor de la cabeza era diminuto. Una ventaja de estas tuercas de vaso frente a otras es su forma de cabeza plana. Si no hubiera sido

así, hubiese sido necesario el calzo citado o, en su defecto, un rebaje que permitiera embeber la cabeza en el material con el mecanizado pertinente. Otra ventaja de la tuerca de vaso usada, es que el orificio central es pasante en todo el elemento, lo que permite añadir un forjado intermedio a la altura del módulo que se requiera.

2.4.4. Modelado tridimensional por software

En este punto vamos a desarrollar el traslado del concepto real de la estructura a un modelo computacional, mediante el uso del software Catia V5. A continuación se seguirá, paso a paso, la creación de la estructura en CAD.

El modo de trabajo seguido es la creación de cada sólido por separado, en “*Part Desing*” () , uno de los módulos de Catia. Este módulo cuenta con las herramientas necesarias para el diseño de sólidos a partir de volúmenes, y no por superficies, como hacen otro tipo de módulos incluidos en el programa. Una vez creados estos sólidos, se empleará el módulo “*Assembly Design*” () para unir los distintos elementos en base a unas condiciones de diseño específicas.

Comenzaremos con la creación del forjado. Para ello, se realiza un boceto mediante el uso del comando “*Sketch*” () . Este boceto se muestra en la **Figura 21** con las restricciones, o “*Contrains*” () , correspondientes. Estas restricciones son las de equidistancia entre lados paralelos y la de igualdad de cotas para cada lado, creada convenientemente con el comando “*Equivalent Dimensions*” () , consiguiendo así que el boceto siempre sea cuadrado y que su punto central coincida con el origen de coordenadas. Una vez se concluye el “*sketch*”, se procede a la creación del volumen deseado. Este sólido es generado por la herramienta “*Pad*”() , cuya función es la generación de dicho sólido mediante la extrusión de un “*sketch*” existente en el modelo.

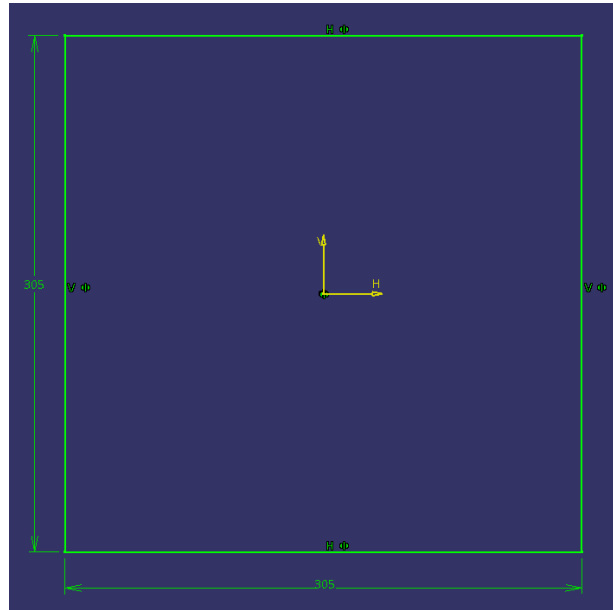



Figura 21. Sketch del forjado.

Para continuar con el modelado se crea, mediante el útil “Hole” () , un taladro en el sólido que ya tenemos. Este servirá como modelo para el resto de taladros existentes en el forjado. Una vez dado valores característicos a dicho taladro, se lleva a cabo la situación del centro del orificio en el punto requerido, mediante su sketch (Figura 22).

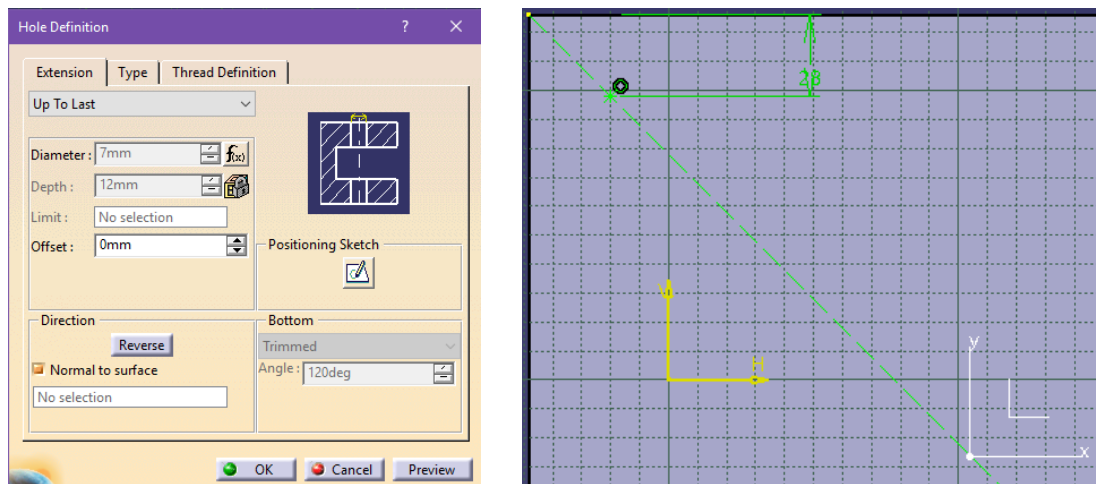



Figura 22. Propiedades del taladro.

Para poder hacer una copia de un elemento en los lugares que se requiere dentro del sólido, es necesario el uso de algún patrón. En este caso es un patrón rectangular (Figura 23), creado con el comando “Rectangular Pattern” ().

Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional

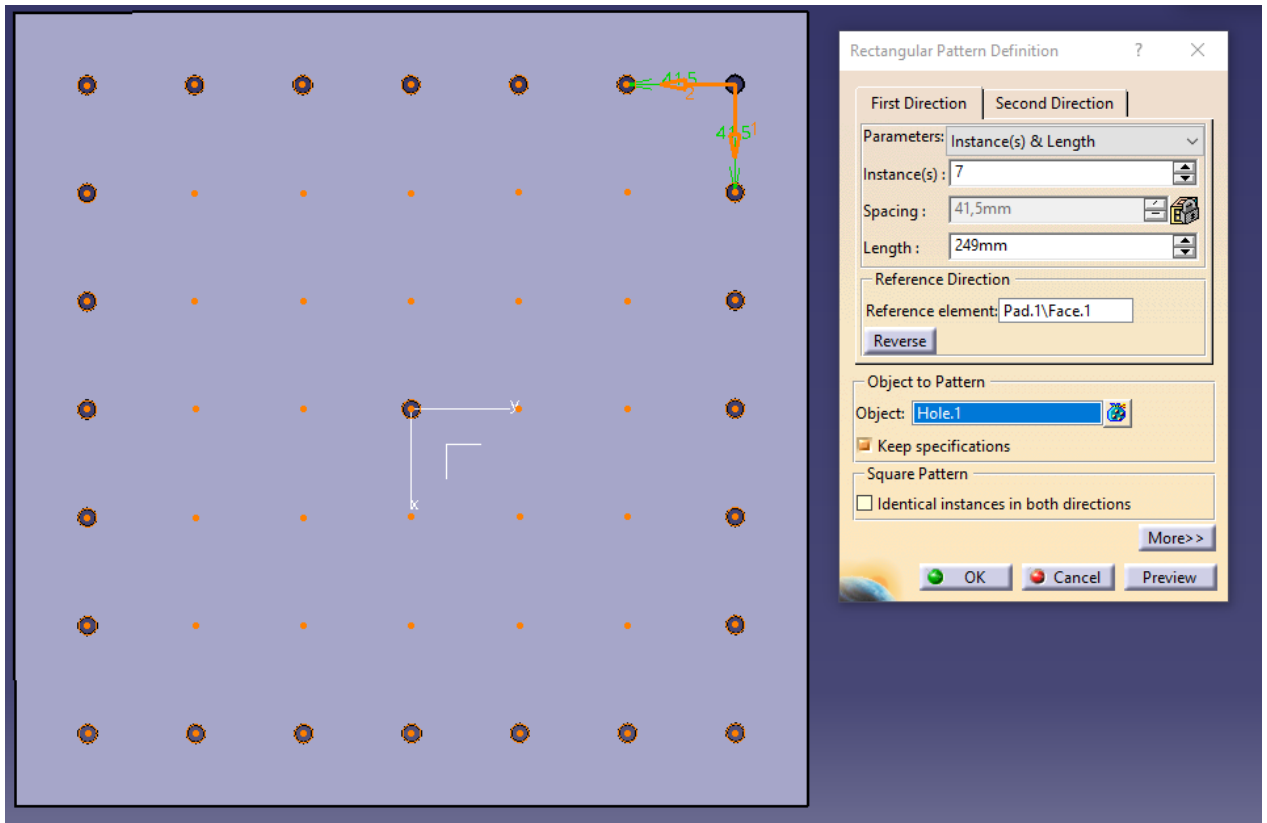



Figura 23. Patrón rectangular de taladros.

Por último, para redondear las aristas del forjado, se seleccionan estas y, gracias al uso del útil “*Edge Fillets*” () , se procede al redondeo, acabando así el modelo del forjado (Figura 24).

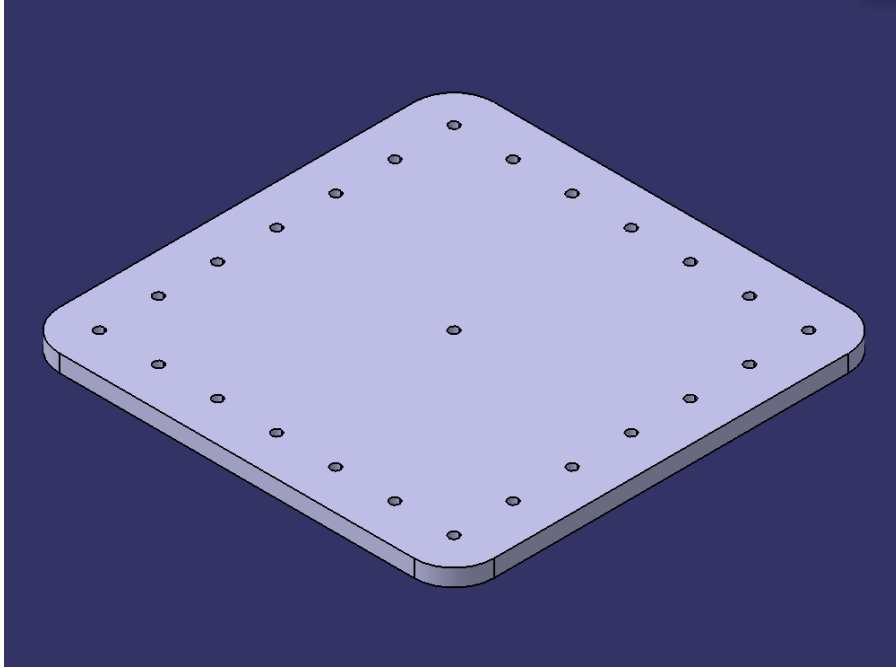


Figura 24. Modelo del forjado.

Otra herramienta utilizada es la denominada “Formula” ($f(x)$). Esta herramienta permite la creación de cualquier tipo de parámetro. Una vez creados estos parámetros, se pueden vincular los valores numéricos de los sólidos a estos, para poder así cambiar las dimensiones del volumen, sin tener que entrar en un sketch determinado.

Una vez puesto como ejemplo el proceso de desarrollo del forjado, es fácil intuir los pasos seguidos para crear el resto de elementos. Por lo que solo se presenta el diseño final de estas piezas (Figura 25).

Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional

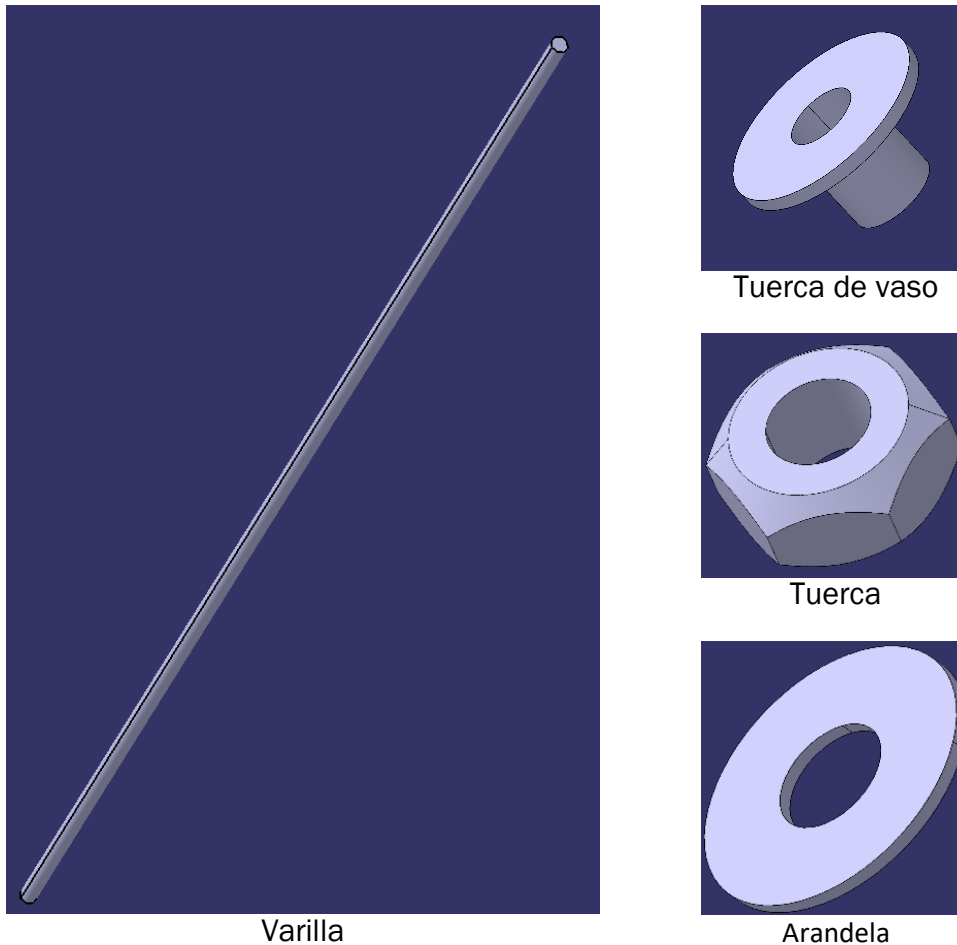



Figura 25. Modelos de los componentes de la estructura.

Una vez se cuenta con todos los elementos constructivos, se prosigue con la explicación del ensamblaje entre ellos.

Considerando que ya se disponen de todos los sólidos requeridos, lo que falta para acabar con el modelado tridimensional de la maqueta es el ensamblaje. Para ello entraremos en el entorno del módulo de “*Assembly Design*”. En resumen, en este módulo, para llevar a cabo la unión de elementos, se debe introducir desde un fichero todos los sólidos por separado. Mediante restricciones de diseño se fijan unos elementos con otros, finalizando así la estructura CAD. Todo esto se comenta más detalladamente en los párrafos siguientes.

En primer lugar, debemos cargar los elementos o conjuntos de elementos en el archivo “*product*” en el que estamos. Para ello seleccionamos el “*product*” y, tras utilizar el util “*Existing component with positioning*” () , nos da la opción de navegar en los ficheros para seleccionar el archivo que queremos implementar al diseño. Una vez que introduzcamos en el “*product*” el primer elemento, hay que

Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional

insertar una condición que conlleve la fijación de este a la bancada. De este modo se pueden incluir el resto de condiciones de diseño que son necesarias en los posteriores componentes que se incluyan en el modelo. Para la fijación de este primer componente se utiliza la herramienta “*Fix component*” (🔧).

Concluido el paso anterior, se añade elemento por elemento y se le aportan las restricciones necesarias. Para ello este módulo cuenta con variedad de posibles herramientas, pero en este caso que estamos maquetando haremos uso del útil “*Coincident constraint*” (📏). Esta opción permite que dos o más elementos de un sólido coincidan en posición. Tras seguir este proceso para todos los sólidos de los que un módulo está compuesto, se implementa en otro “*product*” dichos módulos, como si de un elemento simple se trataran. Estos se unen de la misma manera en que se unían dos elementos simples. Con esto se llega a la conclusión del diseño computacional de la estructura real del laboratorio (Figura 26).

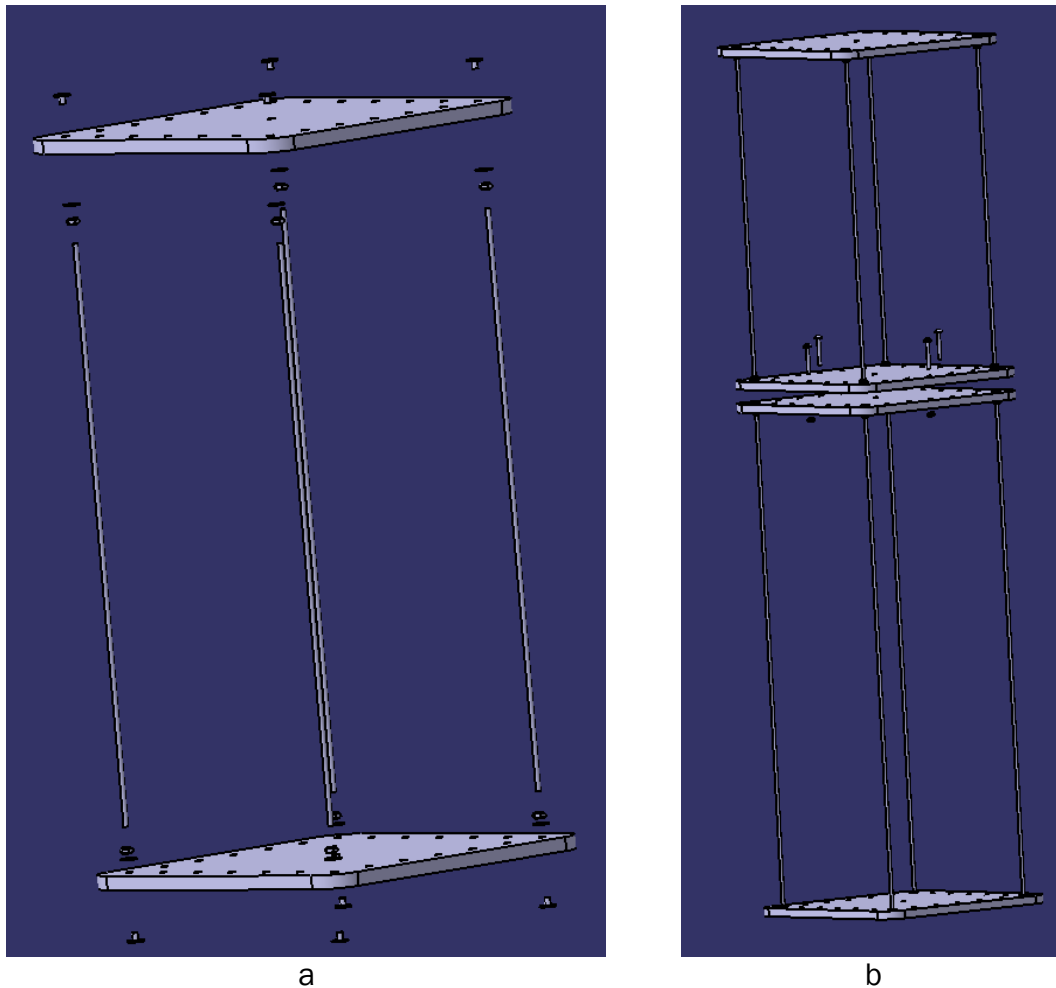


Figura 26. Despiece de la estructura. a) Módulo. b) Completa.

3. Identificación

En este apartado se presenta todo lo relacionado con la identificación y caracterización de la estructura de forma experimental gracias al uso de sensores de fuerza y aceleración, y del software *Dewesoft X3*. Este programa está creado específicamente para cumplir este tipo de tareas. La identificación de una estructura no es más que estudiar cómo se comporta la estructura, es decir, en función de los estímulos aplicados, cómo va a reaccionar. La forma de conseguirlo es mediante un análisis modal, el cual nos da como resultado las características propias del sistema.

El principal objetivo que se busca con este estudio es el de encontrar los modos propios y las frecuencias propias asociadas. Los modos propios son las formas en que se mueve la estructura en las frecuencias más peligrosas, donde se alcanzan las amplitudes más altas y, por lo tanto, donde puede derivarse un fallo estructural, ya que la estructura entra en el fenómeno de resonancia (también puede haber problemas de funcionalidad y confort). Todo esto se analizará en detalle en los siguientes puntos a tratar.

3.1. Set-Up experimental

Con el fin de hallar los parámetros característicos de la estructura se recogen la entrada y salida del sistema. Esta entrada y esta salida se relacionan gracias a unas correlaciones. El software implanta las correlaciones necesarias para conseguir sacar así los valores de estas propiedades o parámetros característicos.

Para identificar la entrada, es decir la excitación aplicada al sistema, se utiliza una célula de carga (**Figura 27**). Esta célula de carga está compuesta de cuatro galgas extensiométricas colocadas en forma de rombo. Gracias a estas galgas la célula de carga es capaz de transformar una deformación en una señal eléctrica que se envía al sistema de recolección de datos. La entrada que se implanta a nuestra maqueta es denominada función impulso, ya que se trata de un impacto con una maza de goma.



Figura 27. Célula de carga.

La respuesta del sistema hace referencia a la reacción de la estructura ante el estímulo aplicado. En este caso esta respuesta se recoge midiendo las aceleraciones de los distintos puntos de la estructura por medio de unos acelerómetros convenientemente situados en la maqueta (**Figura 28**). El funcionamiento de estos acelerómetros está fundamentado en el fenómeno de generación de una señal eléctrica mediante la compresión de un elemento piezoeléctrico. La compresión de este elemento es efectuada por una masa. Cuando esta masa es sometida a un movimiento ejerce una fuerza variable proporcional a la aceleración.



Figura 28. Acelerómetro.

Como acabamos de mencionar, para la captación de datos es necesario el montaje de una célula de carga y de acelerómetros en la estructura, los cuales llevan la información recogida a un sistema de recolección de datos (**Figura 29**) y, de este, al ordenador donde el software se encarga de almacenarlos e interpretarlos gracias a la configuración que se le haya dado con anterioridad.



Figura 29. Sistema de recolección de datos Sirius.

Antes de empezar con el montaje del equipo de medición se pesaron todos los elementos utilizados. Este proceso de pesado es de vital importancia para el correcto modelado computacional que se expondrá en el apartado 4. La medición de estos pesos se ha llevado a cabo mediante una báscula.

Los resultados de la medición de los pesos de los elementos utilizados en la identificación se presentan junto a los pesos de los distintos componentes que forman las uniones de la maqueta en la siguiente tabla.

Elemento	Peso (kg)	
Tuerca de vaso (unión forjado/pilar)	0,0021	0,0067
Arandela (unión forjado/pilar)	0,0024	
Tuerca (unión forjado/pilar)	0,0022	
Tornillo (unión entre forjados)	0,0036	0,0068
Tuerca mariposa (unión entre forjados)	0,0032	
Acelerómetro (Conjunto de acelerómetro)	0,0236	0,112
Imán (Conjunto de acelerómetro)	0,0819	
Banda perforada (Conjunto de acelerómetro)	0,0023	
Tornillo (Conjunto de acelerómetro)	0,0025	
Tuerca mariposa (Conjunto de acelerómetro)	0,0017	
Célula de carga	0,143	

Tabla 1. Pesos de los distintos elementos de la maqueta.

Para el montaje de los acelerómetros fue necesario el uso de unos soportes. Estos soportes están compuestos por un tornillo con su tuerca de mariposa

Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional

correspondiente, y una banda perforada doblada en forma de ele, donde se une un imán para la posterior ubicación del acelerómetro (Figura 30).



Figura 30. Soporte del acelerómetro.

Los acelerómetros están colocados de tal manera que recogen la aceleración de las cuatro esquinas de los forjados para ambas plantas (Figura 31). Al considerarse que el forjado se comporta como un sólido rígido, se desprecian las deformaciones de este, por lo que un acelerómetro capta la aceleración en una dirección para dos puntos.

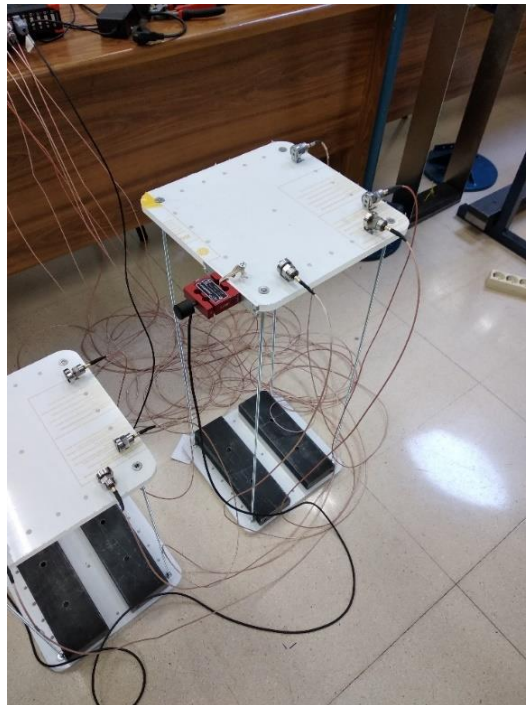


Figura 31. Acelerómetros posicionados.

Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional

Estos puntos son el correspondiente a donde está situado el propio acelerómetro y el que está enfrentado a este justo en el lado opuesto del forjado. A parte de esto se coloca, gracias a unas gomas elásticas, la célula de carga para captar el impulso con el que se excita la estructura. En la **Figura 32** se muestra un croquis de la disposición de los acelerómetros y la célula de carga en la estructura a la hora de hacer el análisis modal. Los acelerómetros están designados como “p x.y”, donde la primera cifra hace referencia a la planta y la segunda, a la disposición del acelerómetro en esta.

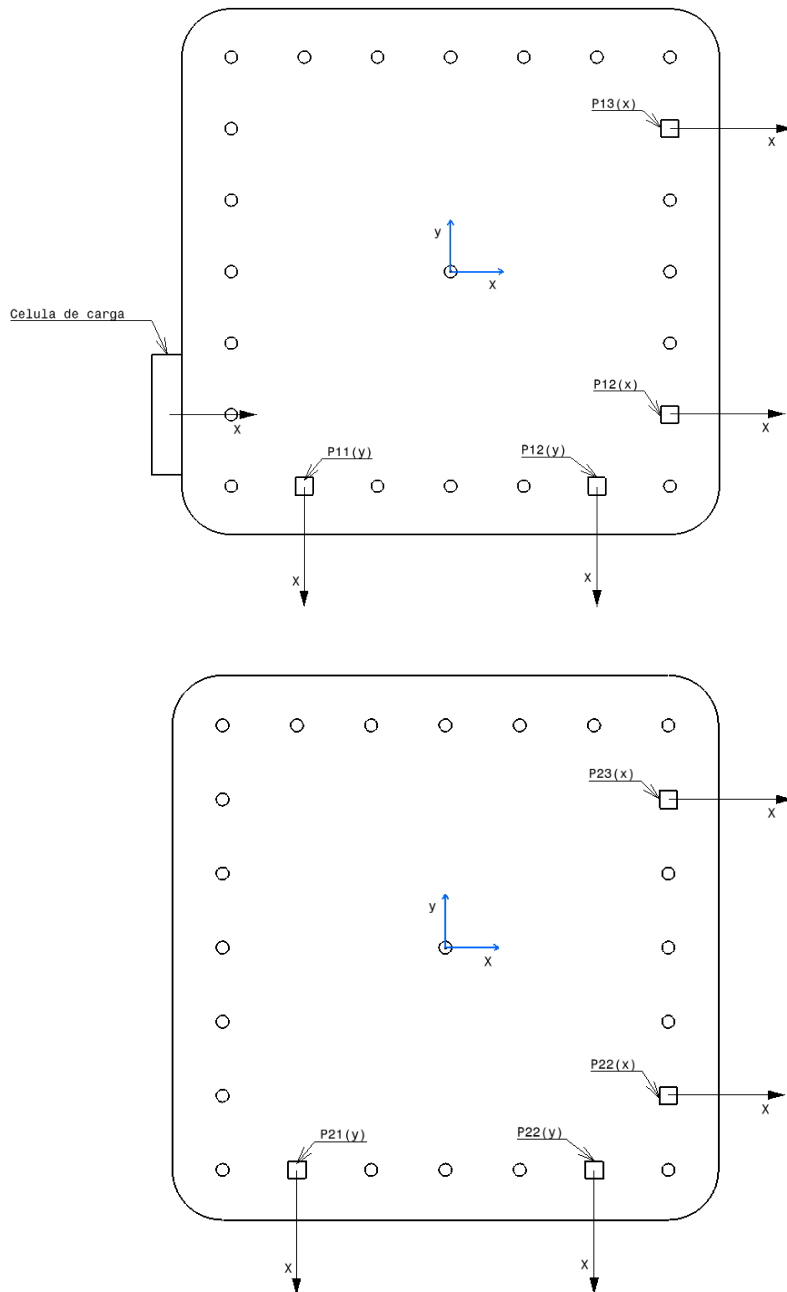


Figura 32. Disposición acelerómetros.

Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional

El montaje de los instrumentos de medida en la maqueta queda terminado obteniendo como resultado la composición experimental mostrada en la **Figura 33**.

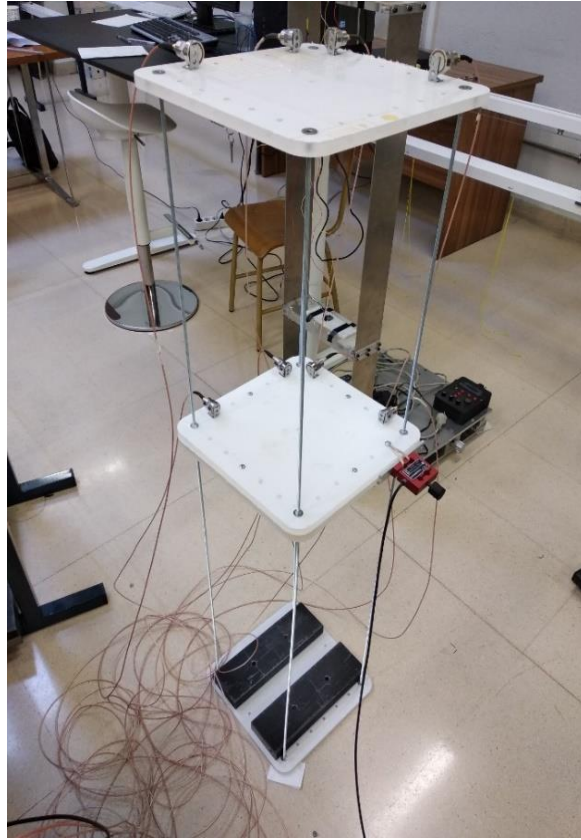


Figura 33. Set-Up del equipo de medición.

3.2. Software empleado

El software disponible en los ordenadores del laboratorio de estructuras para las funciones de identificación de estructuras es *Dewesoft X3*. Este software es propietario de la empresa que fábrica el sistema de recolección de datos. Dewesoft X3 Cuenta con un manejo sencillo y una interfaz que facilita el trabajo con los elementos a utilizar. Dewesoft cuenta también con hardwares propios para la recolección de datos. Uno de estos hardwares es el denominado Sirius utilizado en la experimentación con la estructura.

Dewesoft X3 es un software especializado en la adquisición, registro y posprocesado de datos. Para ello, cuenta con distintos módulos de trabajo, pero se utiliza el módulo propio para el análisis modal. La interfaz gráfica (**Figura 34**) de este módulo es bastante simple, dentro de esta nos encontramos con:

A. Modelo creado para la identificación.

Este modelo de la estructura se establece en un subpanel específico para esta función. Este subpanel se abre clicando en el lugar donde se encuentra situado la representación del modelo.

B. Selección de elementos a visualizar.

Dado el alto número de sensores y de respuestas recolectadas, se hace una selección de estas para su interpretación, ya que no todos los sensores recolectan el mismo tipo de parámetros.

C. Frequency Response Function (FRF) o Función de Respuesta en Frecuencia.

Este parámetro es la respuesta del sistema tras el posprocesado que representa una variable de salida en función de una de entrada en un ancho de frecuencias determinado.

D. Señal de los canales.

En esta sección se encuentran las distintas señales recogidas por los distintos sensores conectados al sistema de recolección de datos.

E. Número de ensayos.

Para la correcta medición de las frecuencias propias se realizan varios ensayos para eliminar así posibles interferencias creadas por las por las distintas vibraciones que se encuentren en el lugar de estudio, como por ejemplo el ruido generado por un ordenador o una conversación, además del eléctrico y el ruido propio de todo el sistema mecánico. Esto permite que las gráficas posprocesadas sean más nítidas y claras para su correcta interpretación.

Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional



Figura 34. Interfaz gráfica principal.

Para la visualización y configuración de los distintos canales conectados se hace uso de las herramientas encontradas en “Measure” ([Measure](#)), situada en la barra de herramientas superior del software. Un ejemplo de esto es el presentado en la **Figura 35**.

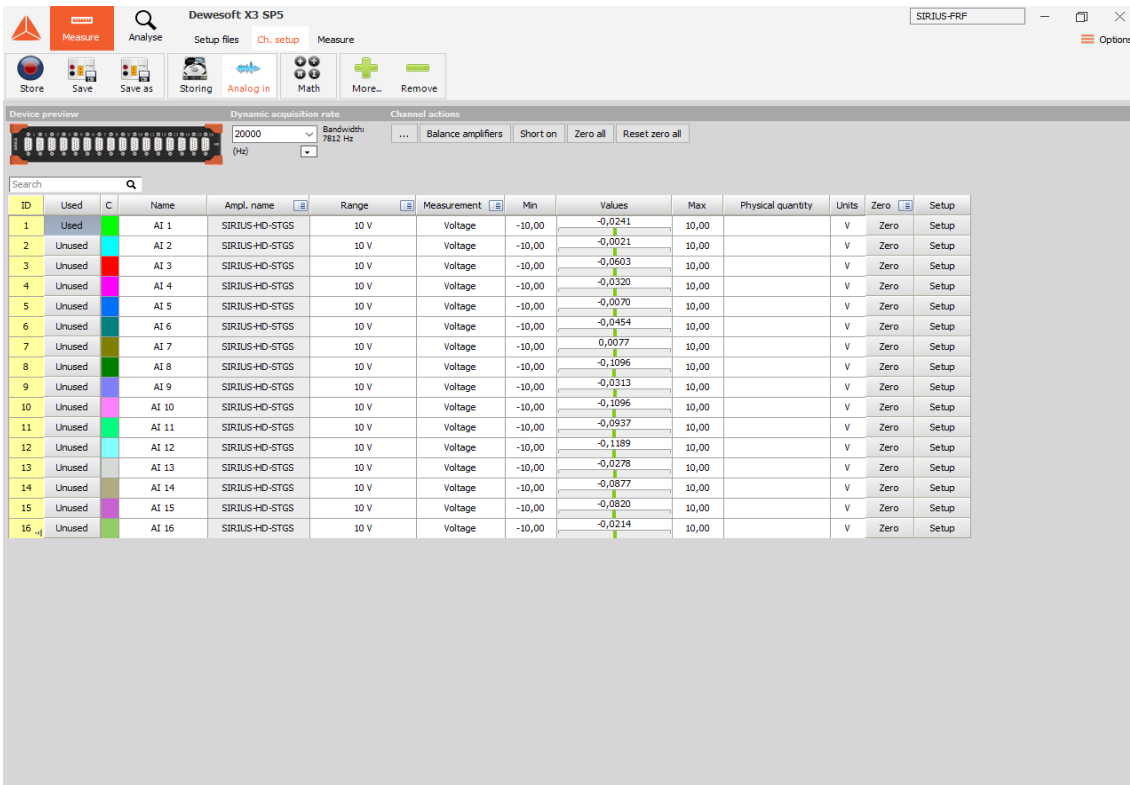


Figura 35. Panel de canales.

3.3. Resultados

En este apartado se expone los resultados obtenidos tras la experimentación con las distintas composiciones de la maqueta. Estas composiciones son el módulo de 500, el módulo de 750 y el conjunto de estos dos, situándose el módulo grande como base para el módulo pequeño. Los modos propios buscados en el análisis modal son los que provocan el movimiento del forjado por medio del desplazamiento de las varillas.

Una vez llevada a cabo la recolección y el posprocesado de datos, el software nos da como resultado del estudio unas FRFs (Figura 36), en donde se encuentran los distintos valores máximos de amplitud de la aceleración según la fuerza aplicada de los puntos del sistema. Estos máximos se encuentran situados en determinadas frecuencias, las cuales se denominan como frecuencias propias. Estas frecuencias denotan los puntos más peligrosos en los que puede entrar el sistema, es decir, donde la estructura alcanza valores de máxima aceleración. Este hecho puede provocar deformaciones permanentes de algún elemento o incluso derivar en un fallo estructural. A estas frecuencias propias van vinculados los modos propios, es decir, el movimiento en que la estructura se mueve o se deforma a dicha frecuencia de oscilación.

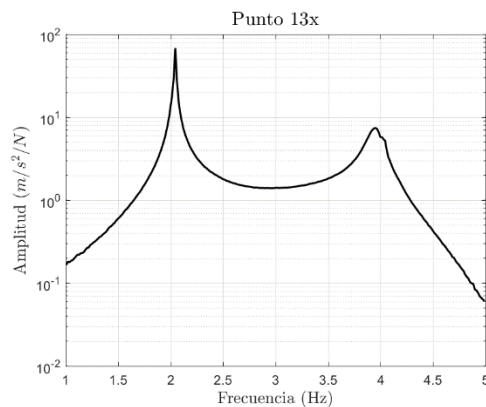


Figura 36. FRF simple.

Las distintas gráficas FRFs nos muestran un espectro de frecuencias bastante grande, pero dado que las frecuencias que nos importan para estudiar el comportamiento de la estructura son de valores bajos, se descartan los valores altos, centrándonos así en un rango de frecuencias de menor tamaño.

Por otro lado, debido al funcionamiento de los elementos de los que está compuesto el acelerómetro, se desestiman los valores a frecuencias extremadamente bajas ya que la captación de estos valores no es fidedigna a los movimientos reales de la maqueta física.

Otro fenómeno para tener en cuenta son las posibles imperfecciones detectadas por el sistema de medición. Un ejemplo de este fenómeno es el que se presentan en la **Figura 37**, contenido entre los tres y cuatro hercios aproximadamente. En este intervalo de frecuencias contamos con una señal con poca amplitud. Por ello, se mezcla con el ruido y hace casi imposible su diferenciación. Para facilitar la interpretación de datos se pueden ajustar las gráficas por el método de mínimos cuadrados utilizando el software Matlab

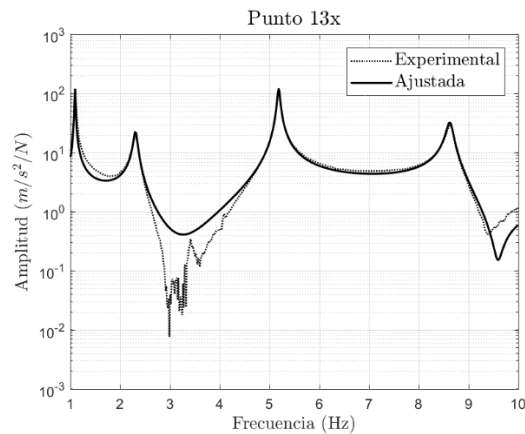


Figura 37. FRF comparada.

3.3.1. Módulos simples

En el ensayo realizado a cada módulo aparecen dos picos en las gráficas de la respuesta en frecuencias para cada acelerómetro, pero realmente la estructura cuenta con tres modos propios. Este hecho es debido a que hay dos modos lo bastante superpuestos como para no ser perceptibles a simple vista. Sin embargo, haciendo un estudio más a fondo nos damos cuenta de que existen dos máximos diferenciados por unas centésimas de hercio. La cuasi coincidencia de estos modos es debida a que se produce el mismo fenómeno, pero para direcciones diferentes.

Los modos propios en los que entra el sistema compuesto por un módulo simple son dos movimientos de flexión y otro de torsión, como se puede intuir si se analiza la composición de la estructura. El análisis modal es capaz de caracterizar la estructura en su totalidad. Un ejemplo de ello es la **Figura 38** donde gracias a los resultados recogidos por el software Dewesoft X3 se obtienen los modos propios, las frecuencias

Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional

propias y los amortiguamientos del sistema. Este amortiguamiento es la capacidad que tiene el sistema para disipar la energía de la respuesta del sistema, es decir, la capacidad que tiene el sistema para volver al estado de equilibrio en el menor tiempo posible.

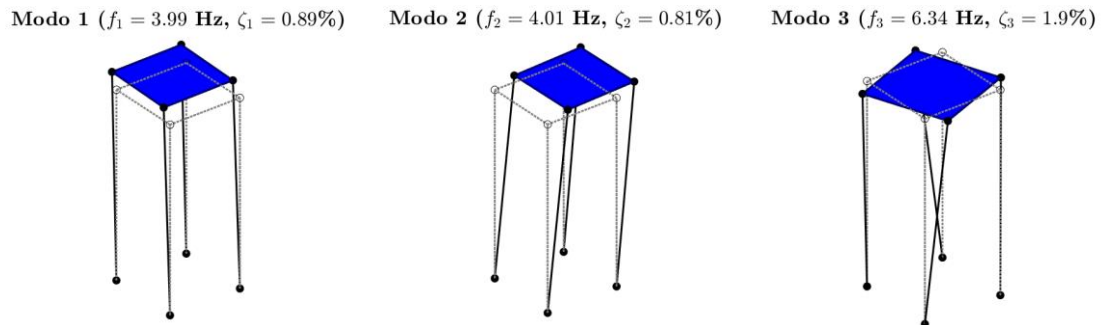


Figura 38. Modos propios del módulo 500.

Dentro de cada composición se hicieron varios ensayos. Tomar una única medida lleva como consecuencia una incertidumbre de medición mayor. La sucesión de mediciones no solo hace que la incertidumbre sea menor, sino que promedia todos los posibles ruidos externos captados por los acelerómetros. El ruido blanco es aquel que cuenta con una media nula. Por ello al promediar este ruido su efecto se mitiga. Sin embargo, si el ruido es de otra naturaleza no es posible eliminarlo en su totalidad de la señal recogida.

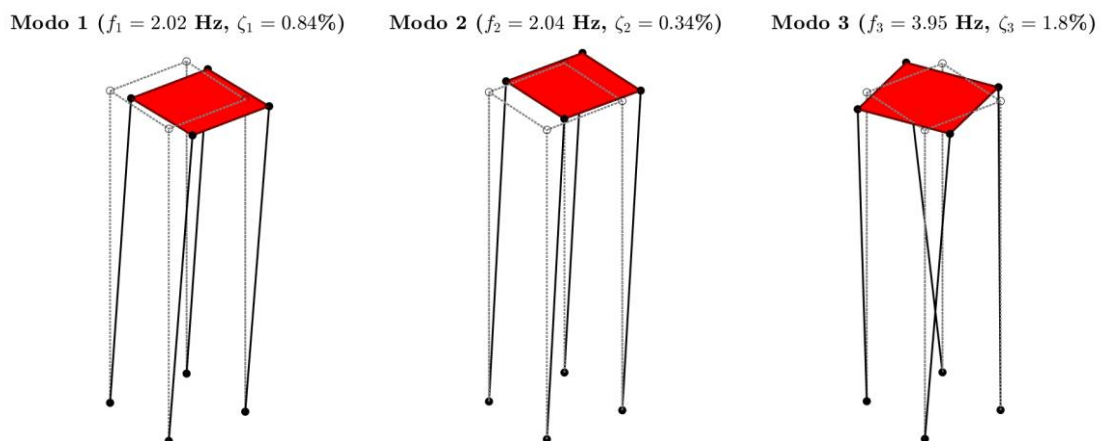


Figura 39. Modos propios del módulo 750.

La frecuencia propia aumenta cuando lo hace la rigidez de la estructura y disminuye con la masa. Como la diferencia de masa de los dos módulos es prácticamente despreciable, los distintos valores de frecuencias propias vienen dados por la longitud de las varillas. Como es imaginable un módulo más alto es más endeble y, por tanto, menos rígido. Por ello, las frecuencias obtenidas para el módulo de 500 son mayores que las del módulo de 750 (**Figura 39**).

Un elemento más rígido se detiene antes que uno más flexible ante una misma excitación. Por ello la estructura del módulo de 750 cuenta con valores de amortiguamiento menores, es decir, tarda más en volver a la posición de equilibrio.

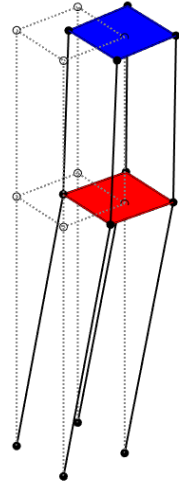
3.3.2. Conjunto de módulos

El proceso seguido para la realización del análisis modal de esta composición es idéntico al llevado a cabo para los módulos simples. En este caso no se intuye a simple vista todos los modos propios de la estructura. Un ejemplo del modelo de esta composición así como de las características del sistema se presentan en la **Figura 40**.

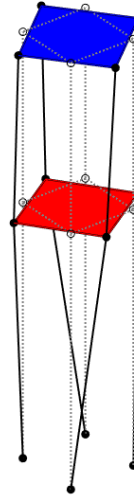
Los valores máximos de las FRFs en este caso son cuatro, aunque pasa como en los casos anteriores, realmente hay seis modos propios, pero hay dos pares de ellos que se superponen en una misma frecuencia. Los modos coincidentes son los referentes a los de flexión como ocurre con los módulos simples. Los dos primeros modos son los de flexión coincidentes, donde el módulo inferior se flexiona en el mismo sentido que el superior, aunque en este segundo la flexión es prácticamente despreciable. El tercer modo es de torsión donde ocurre como en el caso de los dos modos anteriores, giran ambos en la misma dirección, pero el desplazamiento relativo del forjado superior es mínimo. Los dos siguientes modos que nos encontramos en las gráficas son los otros dos modos de flexión coincidentes en frecuencia. En este caso la flexión es en sentidos contrarios para cada forjado, siendo además perceptible el desplazamiento relativo del forjado superior. Por último, nos encontramos el último máximo que buscamos en las FRFs, este es un movimiento de torsión. El forjado medio y el forjado superior giran en sentidos contrarios, siendo significativo el movimiento relativo del módulo superior.

Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional

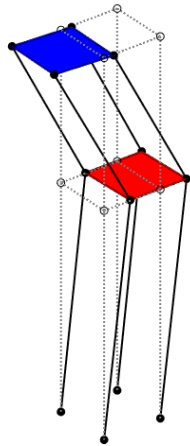
Modo 1 ($f_1 = 1.1 \text{ Hz}$, $\zeta_1 = 0.45\%$)



Modo 2 ($f_2 = 2.3 \text{ Hz}$, $\zeta_2 = 1.6\%$)



Modo 3 ($f_3 = 5.2 \text{ Hz}$, $\zeta_3 = 0.5\%$)



Modo 4 ($f_4 = 8.6 \text{ Hz}$, $\zeta_4 = 0.74\%$)

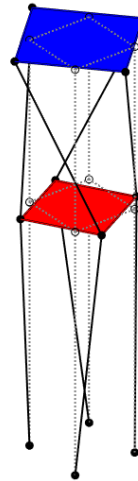


Figura 40. Modos propios del conjunto de módulos.


4. Simulación computacional

4.1. Validación de software

Para validar el proceso de modelado computacional efectuado y el funcionamiento del cálculo de elementos finitos seguido por Catia, se procede a ejecutar dos modelos de una viga cilíndrica. Gracias a la simplicidad de los sistemas, los cuales son conocidos completamente a nivel teórico, es fácil comparar el modelo creado en Catia con los resultados teóricos obtenidos en el cálculo analítico.

4.1.1. Modelado

4.1.1.1. Biapoyada

Para empezar con el análisis modal de uno o varios elementos, se necesita crear un “part”, ya sea haciendo uso del módulo de sólidos o superficies de los que Catia dispone para ello. Para crear la viga a estudiar se emplea el útil “Line” (). Una vez hecho esto se selecciona un punto, en este caso el origen, y después una dirección clicando en el eje. La viga por estudiar tiene una longitud de un metro (**Figura 41**).

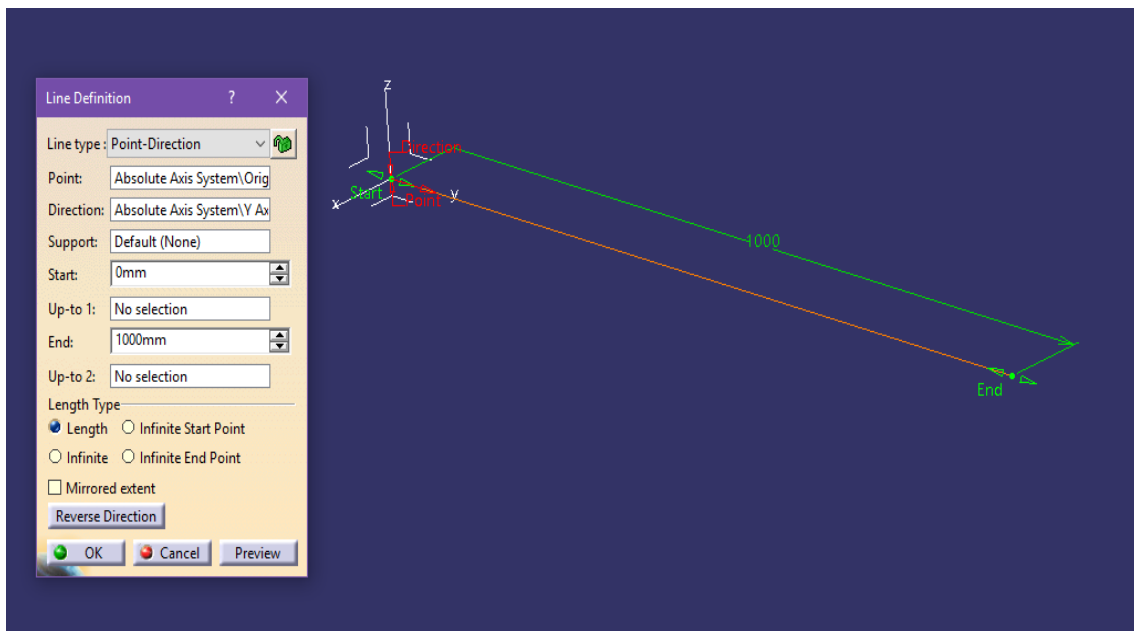


Figura 41. Parámetros de la línea.

A continuación, una vez se dispone del sólido a estudiar, se procede a caracterizar este para que el software realice los cálculos pertinentes para hallar las frecuencias propias del sistema.

Para ello se hará uso del módulo de análisis de Catia, más concretamente el análisis de frecuencias (**Figura 42**). El primer paso es la introducción de los materiales, de los

cual está compuesto el elemento, utilizando la herramienta “*User Material*” (). El material seleccionado para la viga por estudiar es el acero que se encuentra por defecto en la librería de materiales de Catia.

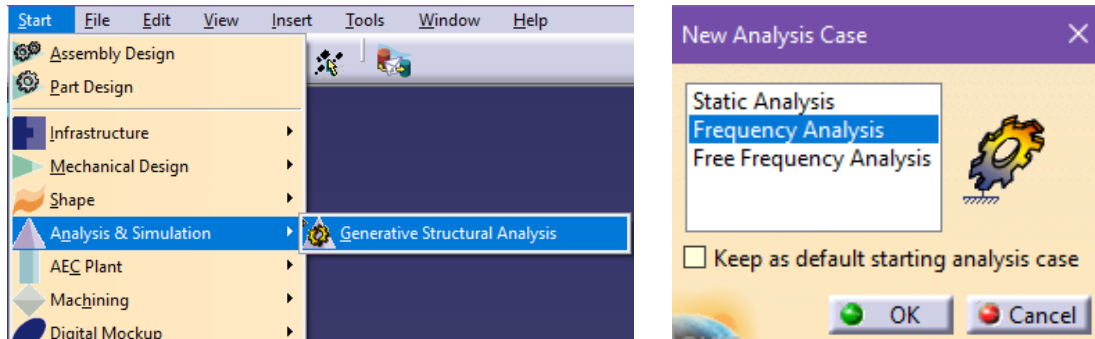


Figura 42. Módulo de análisis.

El mallado es, en este caso, para un elemento unidimensional, por lo que se utiliza el comando “*Beam mesher*” (). Este comando permite determinar el tamaño de los elementos finitos en que se divide la línea (Figura 43), teniendo en cuenta que al tener un mallado menor, es decir, que tenga más elementos, el cálculo será más preciso.

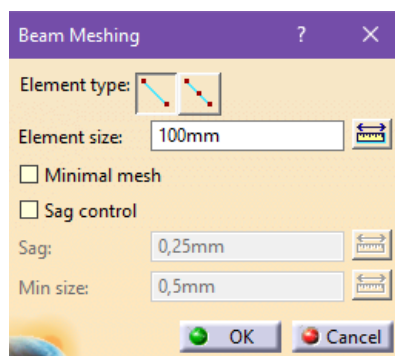


Figura 43. Mallado de una dimensión.

El siguiente paso es dar propiedades al mallado anterior. Para esta función se selecciona el útil “*1D Property*” (). Este es el momento de elegir el material del que está compuesto el elemento gracias a la opción “*User-defined material*” (Figura 44). En esta ventana se selecciona también el tipo de elemento esbelto que se necesita con los valores geométricos correspondientes. En el panel que Catia pone a disposición se utiliza la opción “*Component edition*” () para la introducción de los valores de las distintas dimensiones de la sección. La viga circular modelada tiene diez milímetros de diámetro.

Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional

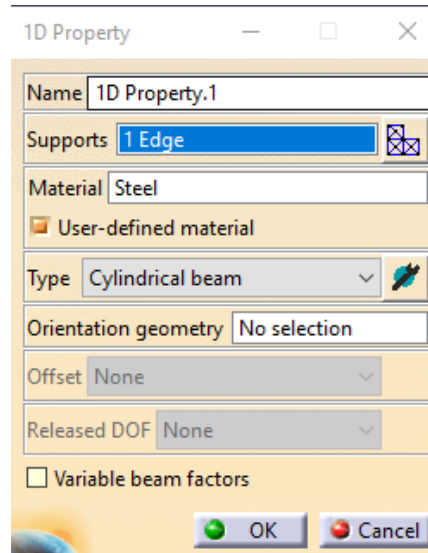



Figura 44. Propiedades del mallado en una dimensión.

Por último, se debe crear las condiciones de contorno necesarias, para que así el modelo cumpla con las restricciones deseadas. La viga planteada consiste en una viga biapoyada, por lo que se restringe el desplazamiento de los extremos en todas las direcciones, así como su giro en el eje directriz de la viga (Figura 45). La creación de dichas condiciones de contorno se realiza mediante la opción “*User-defined Restraint*” (), teniendo en cuenta en todo momento los ejes locales de cada elemento.

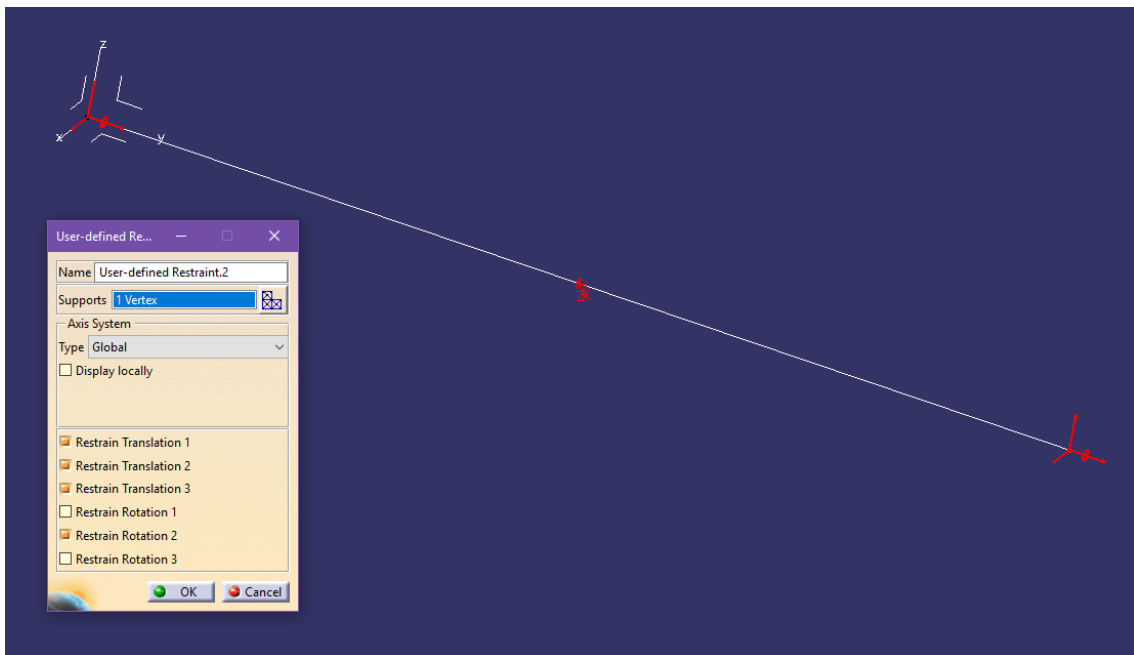



Figura 45. Restricciones del modelo.

Con este último paso queda terminado el proceso de modelado de la viga biapoyada. Para la resolución del cálculo matemático vinculado al método de elementos finitos utilizado por el software, se utiliza la herramienta “Compute” (), la cual realiza dichos cálculos haciendo uso de las condiciones impuestas en el modelado anteriormente comentado. Tras este proceso, el software genera en el árbol de manipulación un listado de las frecuencias propias del sistema, llamado por el programa “Frequency List” (Figura 46).

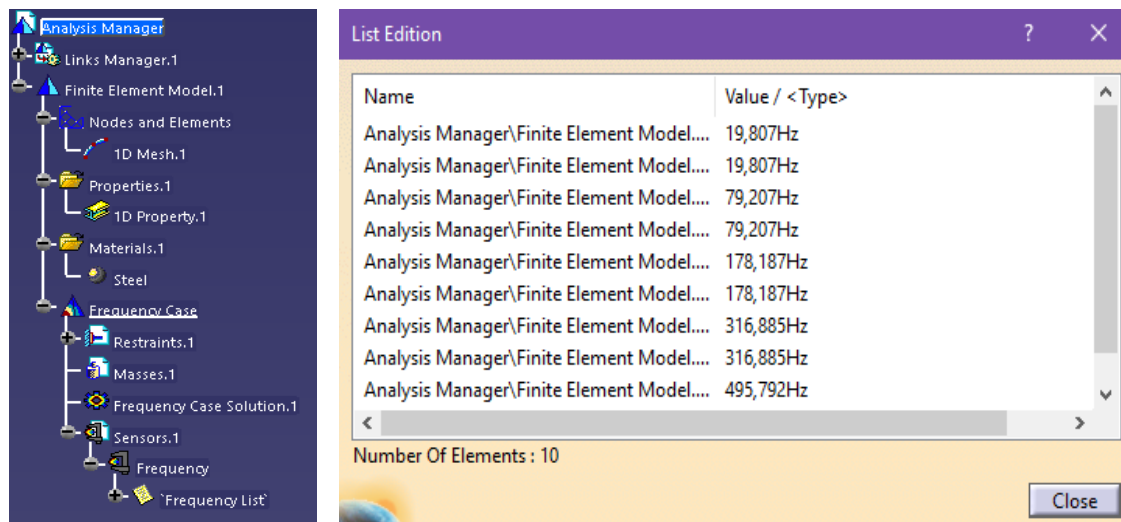


Figura 46. Frecuencias propias de la viga biapoyada.

4.1.1.2. Biempotrada reducida por simetría

El modelo de esta viga coincide con el comportamiento real de la maqueta. Por esta razón es de gran importancia comparar este caso con los valores analíticos obtenidos. Una vez validado el modelo de esta viga, se puede asegurar que los resultados obtenidos al simular la estructura completa son calculados correctamente.

La composición de este modelo consta de una viga biempotrada. En uno de los extremos el empotramiento es fijo, mientras que en el otro es móvil. En este último extremo ira situada una carga concentrada por medio de la colocación de una masa.

Para la simulación del modelo se hace uso de dos líneas, una de ellas lo suficientemente corta para simular la masa concentrada una vez se implanta esta masa sobre la línea. La suma de las longitudes de estas líneas debe ser la utilizada en el cálculo analítico.

El procedimiento computacional usado para la creación de las líneas que simulan la viga es distinto al utilizado en el anterior apartado. En este caso se hace uso de la herramienta “Sketch” (📐) para crear el boceto de las líneas (Figura 47). Una vez nos encontramos en el entorno de “sketch” empleamos el útil “Profile” (📏) para crear una polilínea con las dimensiones de los dos tramos de la viga. En este caso el pedazo de viga donde ira colocada la masa en un futuro es de 50 mm, debido a que si este tramo es demasiado corto provoca errores en el cálculo posterior.

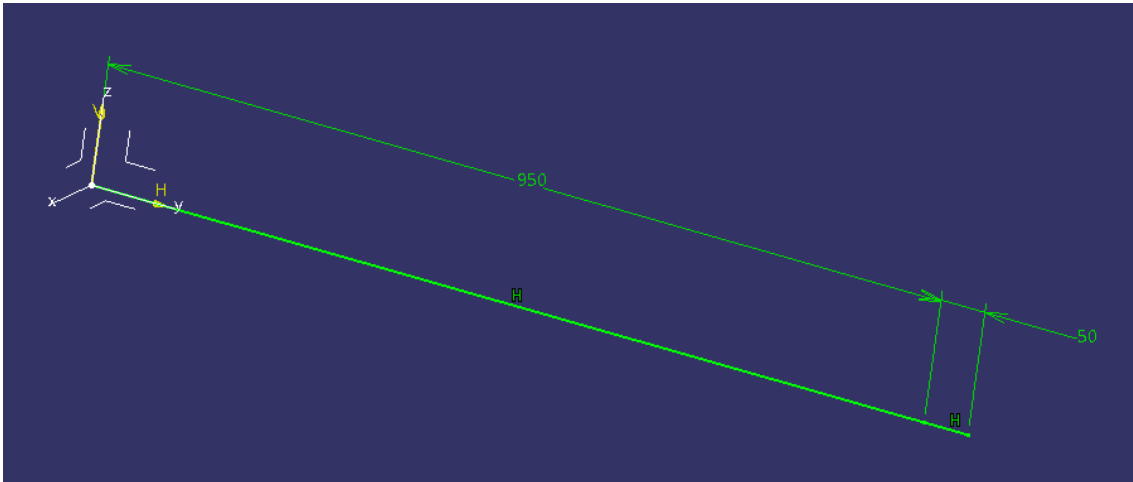



Figura 47. Polilínea del modelo biempotrado por simetría.

A continuación, se seleccionan estas líneas y se extraen del boceto para que el módulo de análisis pueda trabajar con ellas. El útil utilizado para realizar esta función se denomina “Output feature” (📄). Esta forma de crear el modelo es más tediosa para el caso en que nos encontramos, pero facilita el trabajo para geometrías más complejas.

Por último, se ensamblan ambas líneas con la herramienta “Join” (🔗) para que el módulo de análisis las considere como una única línea. Este proceso agiliza el posterior proceso de otorgar al modelo las distintas características de análisis (Mallado, Propiedades de mallado, Conexiones...).

Como se ha hecho en el caso anterior, se utiliza el análisis de frecuencias disponible en el módulo “Generative Structural Analysis”. El primer paso a seguir es el de mallar la polilínea de nuestro modelo. Se utiliza el comando “Beam mesher” (🔧) para el mallado del conjunto. Seleccionamos una de las dos líneas por las que está compuesta la polilínea para crear el mallado, ya que gracias a que las hemos unido en la creación del modelo, las reconoce como un solo componente a la hora de dividir la polilínea en elementos finitos. Antes de continuar con la implementación de

propiedades a nuestro modelo, necesitamos agregar el material de la viga; en este caso, el acero disponible en la librería de materiales que encontramos en Catia.

Para dotar de las características geométricas necesarias al mallado/viga se utiliza el comando “1D Property” (). La viga de acero a estudiar es cilíndrica con un radio de veinte milímetros. (Figura 48).

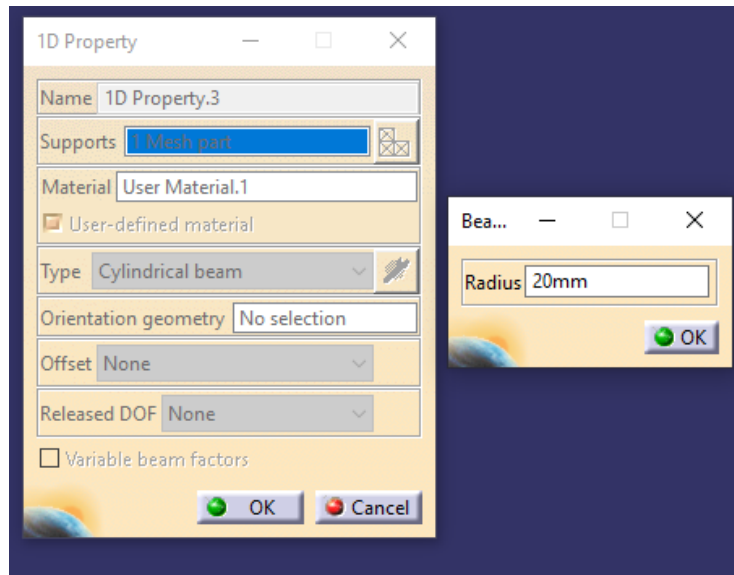



Figura 48. Propiedades de la viga biempotrada simplificada por simetría.

Para la creación de condiciones de contorno utilizaremos dos útiles distintos para cada extremo de la viga. En un primer lugar impondremos un empotramiento fijo en el extremo más alejado del tramo de la barra donde ira colocada la masa, es decir, el extremo situado en el origen de coordenadas. Para ello haremos uso de la opción “Clamp” (). A la hora de realizar dicha restricción hay que asegurarse de que el punto seleccionado es el punto perteneciente a la línea modelo y no el origen de coordenadas. Si no se selecciona convenientemente, escoge automáticamente el origen como punto a empotrar, creando así un futuro problema cuando se efectuó el cálculo. Cuando dos o más elementos coinciden en el espacio y se quiere seleccionar uno de estos, se sitúa el cursor en dicho punto y mediante el uso de las flechas del teclado te permite la navegación dentro de estos elementos (Figura 49), una vez se encuentra el elemento deseado se hace clic izquierdo para su selección.

Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional

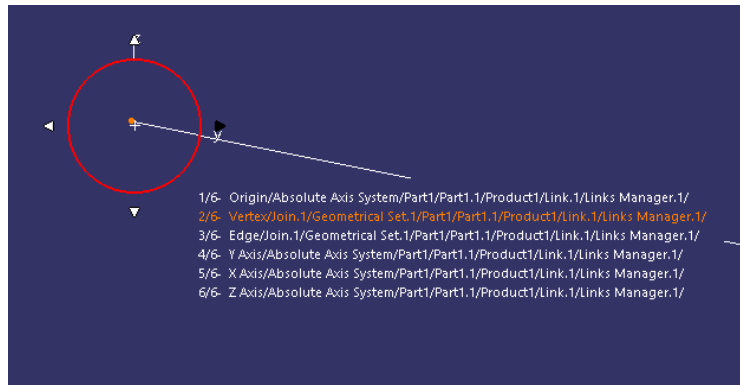



Figura 49. Navegación entre elementos coincidentes.

En el otro extremo de la viga se implanta un empotramiento móvil. Para esto se emplea la herramienta “*User-defined Restraint*” () , seleccionando como impedimentos todos los giros y los desplazamientos de los ejes “x” e “y” (Figura 50). Como se ha dicho en apartados anteriores, es de vital importancia asegurarse de los ejes escogidos, ya que estos no siempre coinciden con los ejes globales del modelo.

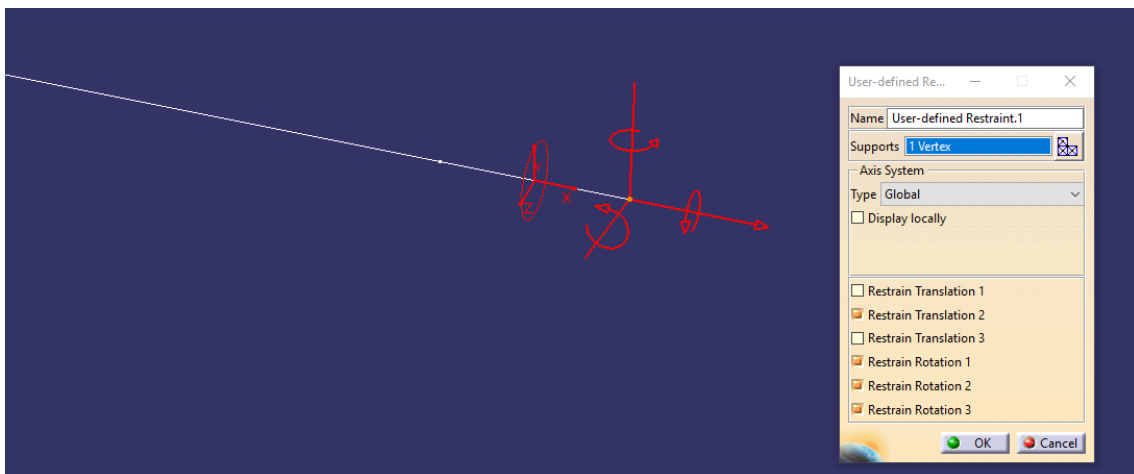



Figura 50. Empotramiento móvil del modelo biempotrado con simetría.

Catia está muy limitado en los casos en que se cuenta con un modelo compuesto de distintos tipos de elementos y no un único elemento sólido. Por este motivo se ha hecho uso del tramo pequeño de barra para situar una masa distribuida y que esta se comporte como una masa concentrada en el extremo. La implementación de dicha masa se lleva a cabo seleccionando la opción “*Distributed mass*” () . La carga que se usa en el modelo es de un kilogramo (Figura 51).

Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional

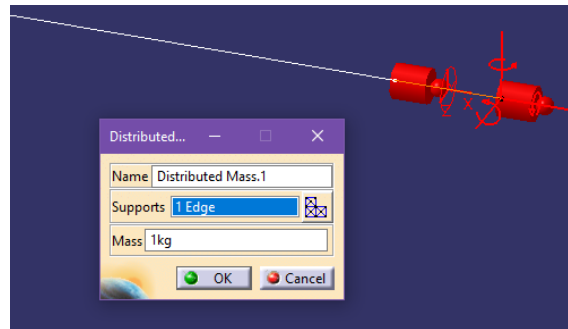


Figura 51. Masa concentrada en el extremo.

Hasta este punto llega el proceso de modelado de la viga biempotrada con una masa central, reducida a la mitad por simetría (Figura 52).

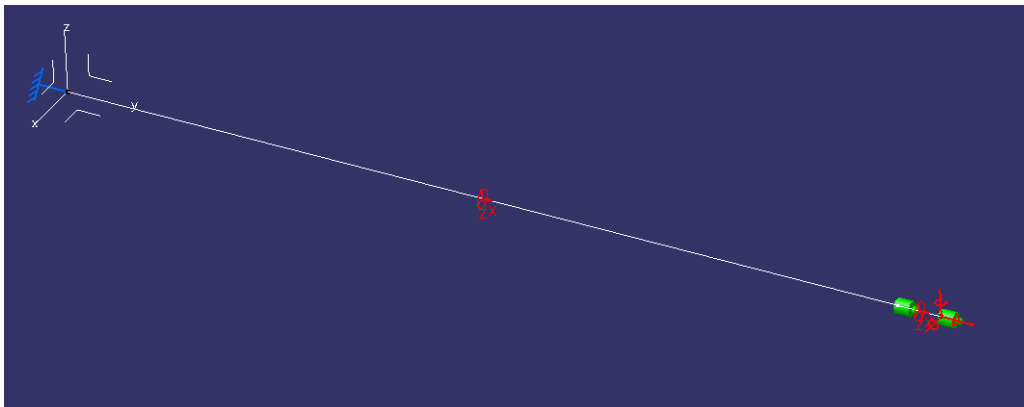



Figura 52. Modelo viga biempotrada reducida por simetría.

Dado que el modelo con el que contamos es representativo del comportamiento y funcionamiento de la estructura real, se han planteado tres tipos de situaciones. Estas situaciones permiten estudiar el modelo con profundidad para asegurarse así de su correcta validación.

Para calcular los resultados de los distintos casos estudiados se utiliza el comando "Compute" (), generando así la lista de frecuencias propias (*Frequency List*) del sistema calculado (Estas listas de frecuencias son las presentadas en la Figura 53).

Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional

Number Of Elements : 30

Name	Value / <Type>
Analysis Manager\Finite Element Model...	87,464Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	6602,625Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	11344,1Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	18095,523Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	23669,473Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	34788,223Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	46724,164Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	53319,16Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	57322,918Hz

a

Number Of Elements : 30

Name	Value / <Type>
Analysis Manager\Finite Element Model...	44,816Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	178,212Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	240,708Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	486,235Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	588,586Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	940,315Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	1079,861Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	1528,125Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	1585,047Hz

b

Number Of Elements : 30

Name	Value / <Type>
Analysis Manager\Finite Element Model...	39,99Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	178,206Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	223,578Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	486,124Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	552,478Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	939,522Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	1023,991Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	1524,763Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	1585,047Hz

c

Figura 53. Frecuencias propias. a) Modelo con masa de la viga despreciable. b) Modelo sin masa adicional. c) Modelo con ambas masas.

Como ocurría en el caso anterior, hay múltiples frecuencias propias, pero el valor a tener en cuenta es el primero, ya que es el caso estudiado analíticamente.

4.1.2. Cálculo analítico

4.1.2.1. Biapoyada

Para el cálculo de las frecuencias naturales de una viga biapoyada se utiliza la ecuación (1), disponible en las múltiples tablas para el cálculo de frecuencias propias de una viga según los apoyos con los que esta cuente, que se pueden encontrar fácilmente en los distintos medios.

$$F = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{EI}{ML^3}} \text{ (Hz)} \quad (1)$$

Donde:

E: Módulo de elasticidad.

I: Inercia de la sección.

M: Masa de la viga.

L: Longitud de la viga.

La longitud de la viga estudiada es de un metro, lo que hace que esta se pueda desprestigiar tanto de la ecuación de la frecuencia, como de la ecuación de la masa comentada más adelante.

El módulo de elasticidad (*Young Modulus*) es propio del material utilizado, por lo que se utiliza el del acero de la librería de materiales, puesta a disposición en Catia (Tabla 2).

Acero	
Módulo de elasticidad	2e+11 (N/m ²)
Coefficiente de Poisson	0,266
Densidad	7860 (Kg/m ³)
Coefficiente de expansión térmica	1,17e-5 (K ⁻¹)
Limite elástico	2,5e+8 (N/m ²)

Tabla 2. Propiedades del acero.

A la hora de la realización del modelado de la viga, se ha definido la geometría de esta como circular, de tal forma que el área de la sección (A) es la que se muestra en la ecuación (2).

$$A = \pi R^2 = 7,854 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \quad (2)$$

Otra propiedad a tener en cuenta del material utilizado es la densidad (ρ), necesaria para el cálculo de la masa de la viga, como se presenta en la ecuación (3).

$$M = \rho L A = 0,617 \text{ kg} \quad (3)$$

Por último, el cálculo de la inercia de una sección circular se realiza utilizando la ecuación (4).

$$I = \frac{\pi R^4}{4} = 4,908 \cdot 10^{-10} \text{ m}^4 \quad (4)$$

Dado que ya se cuenta con todos los valores necesarios para el cálculo de la frecuencia natural de la viga biapoyada, se procede a hallar el valor de dicha frecuencia siguiendo la ecuación (1). El resultado de esta operación es de 19, 809 Hercios.

4.1.2.2. Biempotrada reducida por simetría

El caso analítico en que nos encontramos en este apartado es el de una viga empotrada con carga central, reducida por simetría (Figura 54).

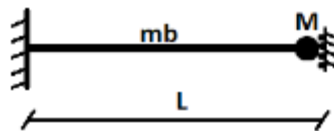


Figura 54. Boceto de la viga biempotrada reducida por simetría.

Si hacemos uso de las tablas de frecuencias citadas en el caso anterior encontramos la ecuación (5) que sigue nuestro modelo para el cálculo de frecuencias propias.

$$F = \frac{4}{\pi} \sqrt{\frac{EI}{L^3(M + 0,3851mb)}} \text{ (Hz)} \quad (5)$$

Donde:

E: Módulo de elasticidad.

I: Inercia de la sección

M: Doble de la masa aplicada en el extremo de la viga modelada.

L: Doble de la longitud de la viga modelada.

M_b: Doble de la masa de la viga modelada.

La fórmula está planteada para una viga biempotrada con masa central y el modelo que hemos simulado computacionalmente esta reducido por simetría. Esta simplificación hace que la longitud, la masa central, y la masa de la barra del modelo sea la mitad a la de la viga sin esta simplificación. Por ello, hay que introducir el doble de estos parámetros dentro de la ecuación.

Para comprobar el modelo en su totalidad se plantean tres casos posibles: La viga sin masa adicional, el peso de la viga nulo y teniendo en cuenta la masa adicional y el peso de la viga.

Para los tres casos citados se cuenta con el módulo de elasticidad del acero denominado en la **Tabla 2** como “*Young Modulus*”. Otro parámetro que se mantiene constante es la longitud, tomando el valor de 2 metros. La viga modelada es cilíndrica por lo que la inercia (6) y el área (7) serán las de una sección circular de 0,02 m de radio.

$$I = \frac{\pi R^4}{4} = 1,257 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4 \quad (6)$$

$$A = \pi R^2 = 1,257 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (7)$$

Para los casos en que se tenga en cuenta el peso de la viga se utiliza la ecuación (8), teniendo en cuenta que el valor de la longitud es el de la viga sin simplificar.

$$m_b = \rho L A = 19,754 \text{ kg} \quad (8)$$

Por último, el valor de la masa adicional aplicada a la viga en los casos en que se requiera es de 1 kg.

Si seguimos la ecuación (5) para los tres casos planteados, obtenemos los valores de las frecuencias de cada sistema como se muestra en la siguiente tabla.

Modelo	Frecuencia propia (Hz)
Masa de la viga despreciable	87,404
Sin masa adicional	44,815
Impuestas ambas masas	39,879

Tabla 3. Resultados analíticos de la viga biempotrada reducida por simetría.

4.1.3. Comparación de resultados

4.1.3.1. Biapoyada

Si comparamos los resultados analíticos con los obtenidos en la simulación computacional, nos damos cuenta de que el error cometido es prácticamente nulo. Este error de cálculo seguramente venga dado por el número de decimales escogido a la hora de hacer el desarrollo analítico.

Modelo	Frecuencia propia simulación (Hz)	Frecuencia propia analítica (Hz)	Error (%)
Biapoyada	19,807	19,809	0,010

Tabla 4. Comparación de resultados de la viga biapoyada.

4.1.3.2. Biempotrada reducida por simetría

Los resultados de los tres casos planteados para la viga biempotrada con carga central reducida por simetría se presentan en la siguiente tabla:

Modelo	Frecuencia propia simulación (Hz)	Frecuencia propia analítica (Hz)	Error (%)
Masa de la viga despreciable	87,464	87,404	0,068
Sin masa adicional	44,816	44,815	0,002
Impuestas ambas masas	39,990	39,879	0,278

Tabla 5. Comparación de resultados de la viga biempotrada reducida por simetría.

Como podemos observar, el caso en el que la viga no cuenta con la masa en el extremo presenta un error prácticamente nulo. Sin embargo, aunque el error cometido en el resto de casos es despreciable, es debido a que en el modelo la carga no está totalmente concentrada en el extremo, sino que está distribuida en un pequeño tramo final de la viga.

4.2. Composiciones ensayadas

En este capítulo se va a desarrollar el modelo simplificado de la estructura real, tanto de los módulos por separado, como de las distintas combinaciones entre ellos. La realización de este modelo se lleva a cabo mediante el software Catia V5, como se ha hecho en otros apartados incluidos en el Trabajo de Fin de Grado.

El conjunto de elementos estructurales a diseñar está compuesto por líneas y superficies. Las líneas son la representación de las varillas de acero, que tienen la función de columnas dentro de la estructura y las superficies son la representación de las placas de metacrilato, las cuales conforman los forjados de la maqueta. Estas líneas y superficies se modifican variando las propiedades cualitativas y geométricas necesarias, de tal manera que se adapten así al volumen real de la estructura.

4.2.1. Modelado

Teniendo en cuenta lo anteriormente comentado, se utiliza el módulo de superficies de Catia, “*Generative Shape Design*” (🔗), ya que no se necesita ningún tipo de volumen para la simulación por elementos finitos. Un requisito a conseguir era que los nodos de cada elemento perteneciente a una unión coincidiesen, para evitar así posibles errores de cálculo debidos a correcciones utilizadas por el programa para este tipo de situaciones. El primer paso constructivo para todos los modelos que se estudiarán más adelante es la creación del forjado base. Creando una única superficie no era posible conseguir la coincidencia de dichos nodos (**Figura 55**), por lo que la estrategia seguida para lograr este objetivo es la realización de nueve subsuperficies independientes y después unir las entre sí creando así una única superficie representativa de la placa de metacrilato (**Figura 56**).

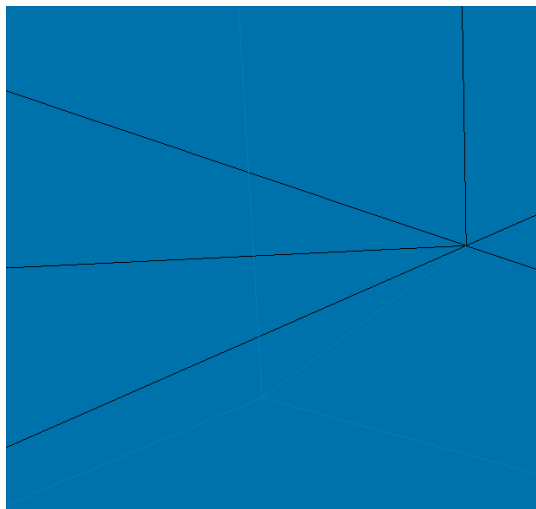


Figura 55. Divergencia de nodos.

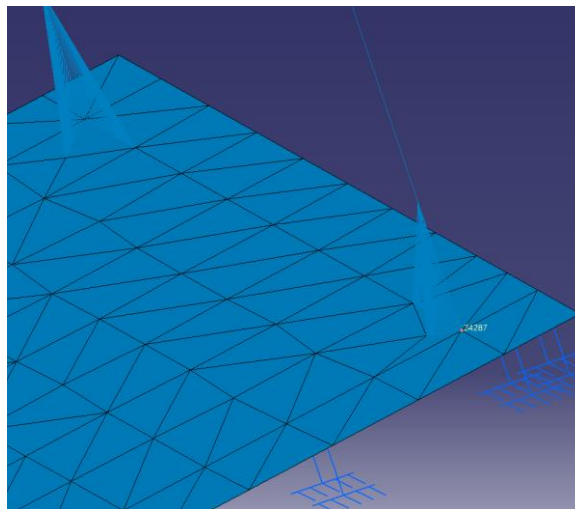




Figura 56. Concurrencia de nodos.

El proceso seguido para la elaboración del forjado es simple: se selecciona el plano que contendrá las superficies, es decir, el horizontal. Después, gracias a la herramienta “*Sketch*” (🔗), se crean los bocetos de las nueve superficies por separado (**Figura 57**). El siguiente paso es la creación de superficies a partir de los nueve bocetos, en nuestro caso delimitados por un perfil cerrado, utilizando la

herramienta “Fill” () . Para finalizar el modelado del forjado base (Figura 58), se unen todas las superficies en una por medio del comando “Join” () .

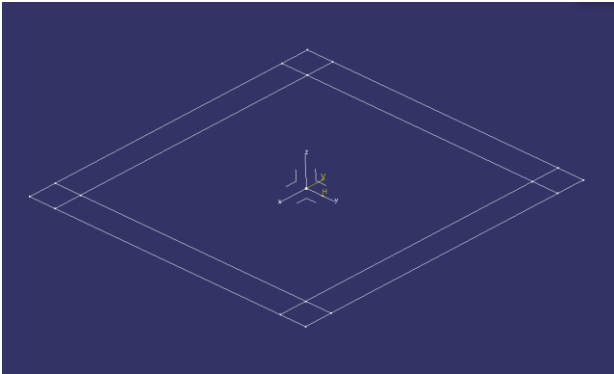


Figura 57. Boceto de las superficies.

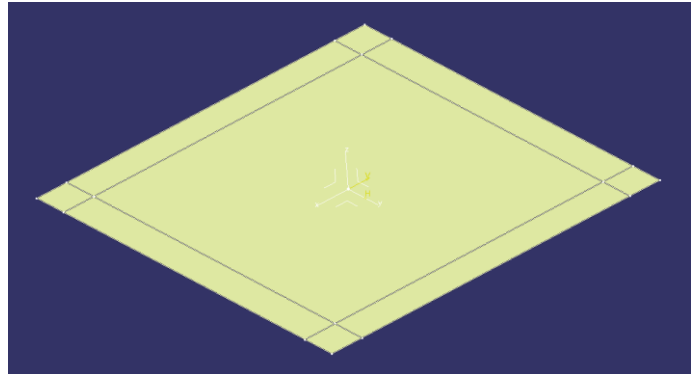



Figura 58. Superficies.

Para seguir con la realización del modelo se elabora el forjado superior, en este caso del módulo de 500. Para poder continuar se necesita un plano secundario (Figura 59) que se utiliza como soporte de las superficies, el cual se implanta con la opción “Plane” () . Una vez creado este plano se seleccionan las superficies del forjado base junto a sus bocetos, se copian (Ctrl+c), y finalmente con el plano secundario seleccionado, se pegan (Ctrl+v), forma habitual de hacerlo en el entorno de la mayoría de softwares.

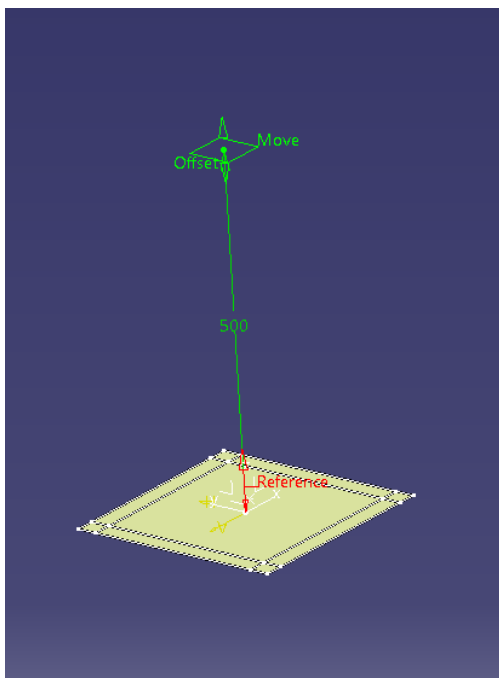


Figura 59. Plano auxiliar del módulo 500.

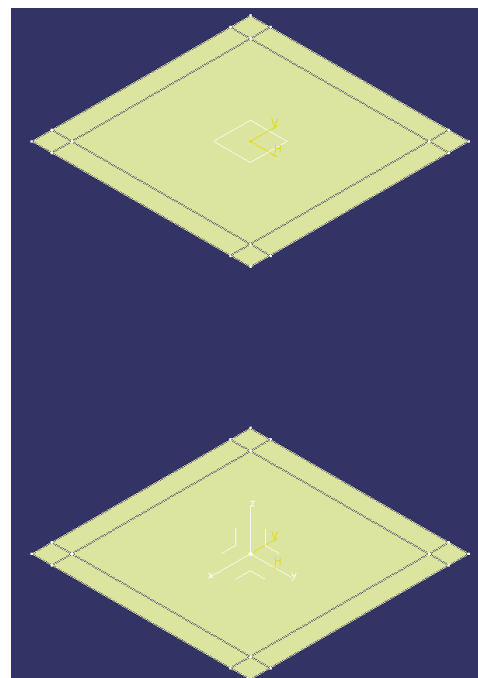


Figura 60. Forjados del módulo 500.

Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional

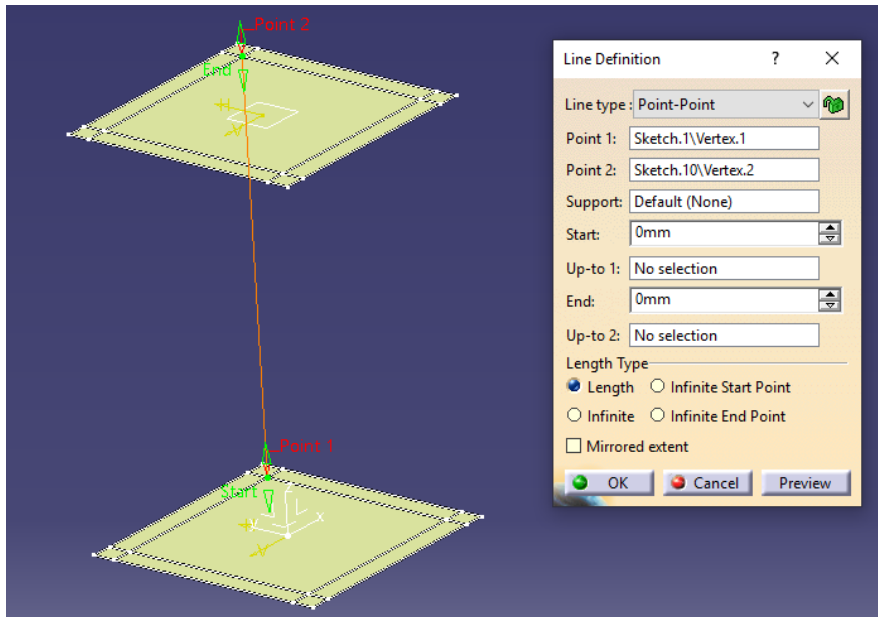



Figura 61. Creación de la varilla.

Realizados ya ambos forjados (Figura 60), solo queda para finalizar la creación de las columnas mediante líneas (Figura 61). Esto se lleva a cabo con el comando “Line” (), seleccionando para ello los dos puntos de los forjados a unir, terminando de esta manera el modelado del módulo de 500.

La creación del módulo grande en comparación con la del módulo expuesto en párrafos anteriores, difiere únicamente en la distancia entre forjados, teniendo en este caso una longitud de 750 mm entre ellos (Figura 62).

Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional

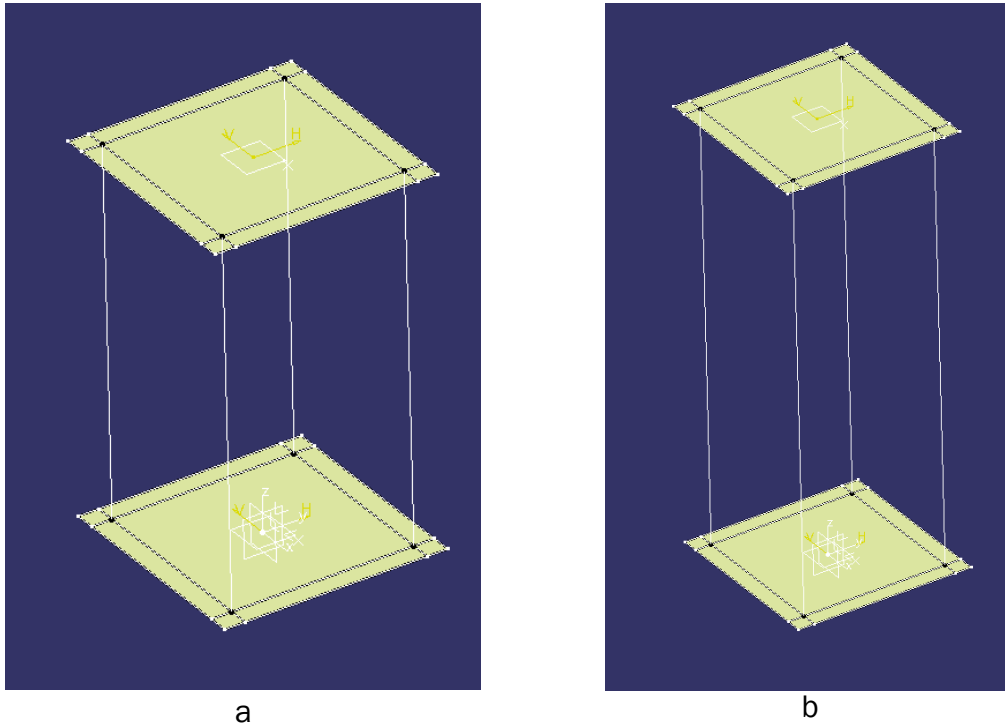


Figura 62. Modelo de los módulos simples. a) 500. b) 750.

La creación del conjunto de dos módulos no cambia mucho en comparación con la de un módulo simple. Dada la composición de la que está formada la estructura caracterizada anteriormente en el apartado de identificación, se crea primero el módulo de 750. Una vez creado dicho módulo, se utiliza este como base para la creación del segundo, en este caso, el módulo de 500.

En primer lugar, y tras tener modelado el módulo inferior, se procede a crear un segundo plano auxiliar. Este plano debe estar a una distancia del primer plano auxiliar igual a la altura del módulo superior (**Figura 63**).

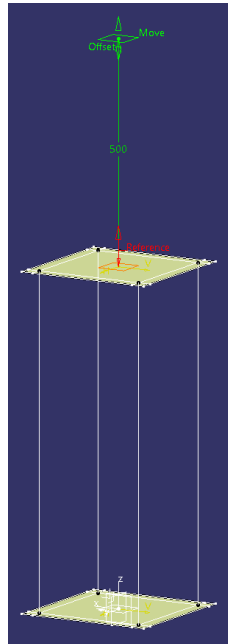


Figura 63. Plano auxiliar secundario.

Este plano se usa de apoyo para copiar los bocetos junto a sus superficies correspondientes, de la misma manera en que se creó el forjado superior del primer módulo. De esta forma se completa el conjunto de forjados de los que la maqueta está compuesta (**Figura 64**). Para concluir el modelado de esta estructura, se añaden los pilares restantes de la misma forma en que se crearon los anteriores, es decir, creando una línea entre los puntos deseados del forjado (**Figura 65**).

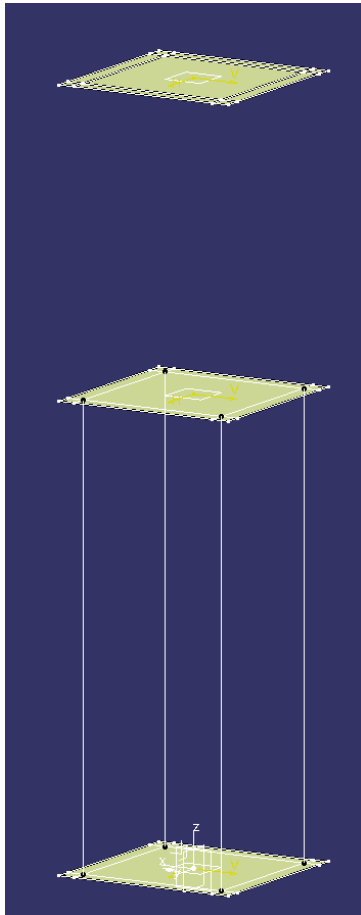


Figura 64. Forjados del conjunto de módulos.

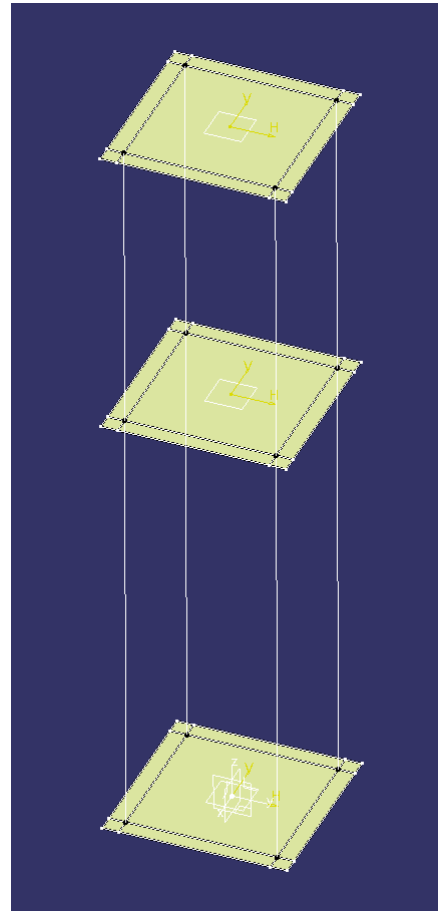




Figura 65. Modelo del conjunto de módulos.

4.2.2. Análisis

En este apartado se realiza un análisis modal por el método de elementos finitos de los modelos creados en epígrafes anteriores, utilizando para ello el módulo existente en Catia para la realización de esta función [3] [4] [5].

En primer lugar, se expone a continuación la configuración y calibración del modelo de un módulo simple. El primer paso es dotar al modelo de un mallado, es decir, dividir los distintos componentes que forman el módulo, en un número finito de elementos. Según sean superficies o líneas, estos elementos se mallan mediante unos útiles u otros. En el caso de las superficies se emplea la opción “*Octree Triangle Mesher*” () , la cual divide dicha superficie en elementos finitos con forma triangular. El programa te permite determinar el tamaño de mallado que se quiere imponer (Figura 66), a menor tamaño, mayor es el número de elementos en que se divide y, por tanto, más preciso es el cálculo que realiza. Para las líneas se utiliza el

Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional

comando "Beam mesher" () . Los elementos finitos generados no son triangulares en este caso, sino elementos barra que dividen el componente mallado en elementos cilíndricos.

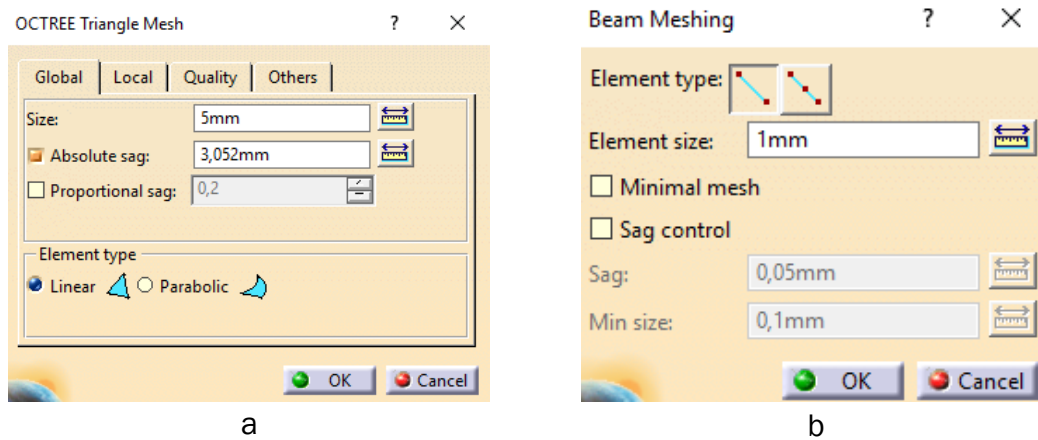





Figura 66. Mallado. a) superficies. b) líneas.

Una vez mallado todos los componentes del módulo, se continúa con la implementación de los materiales de los que el modelo está compuesto, en este caso, el acero y el metacrilato. Para añadir estos materiales se emplea el útil "User Material" () . Para el acero se selecciona el predeterminado por Catia. Sin embargo, el metacrilato hay que crearlo, ya que no se encuentra disponible en la librería de materiales de Catia. Su creación se realiza mediante el módulo "Material Library" () . Este entorno nos permite seleccionar las propiedades del material (Tabla 6). Estas características se han obtenido buscando convenientemente en diversas fuentes disponibles.

Metacrilato	
Módulo de elasticidad	3,32e+9 (N/m ²)
Coefficiente de Poisson	0,35
Densidad	1200 (Kg/m ³)
Coefficiente de expansión térmica	7e-5 (K ⁻¹)
Limite elástico	7e+7 (N/m ²)

Tabla 6. Propiedades del metacrilato.

El siguiente paso consiste en dar propiedades al mallado creado con anterioridad. A la hora de dar estas propiedades, sucede como en el caso de la realización del mallado. Según el tipo de elemento con el que contemos se emplean unas herramientas u otras. Se utiliza el útil “*2D Property*” () para las superficies, donde seleccionamos el espesor del forjado, el material del que está compuesto y la altura en que se encuentra la superficie media (**Figura 67**). El proceso seguido por el programa a la hora de crear un volumen a partir de una superficie es generando la mitad del espesor para cada lado de la superficie media, que por defecto se sitúa en la posición de la superficie original. Por esta razón añadiremos un *offset* a nuestro modelo para modificar así la superficie media, desplazando así la posición en la que se generan los forjados.

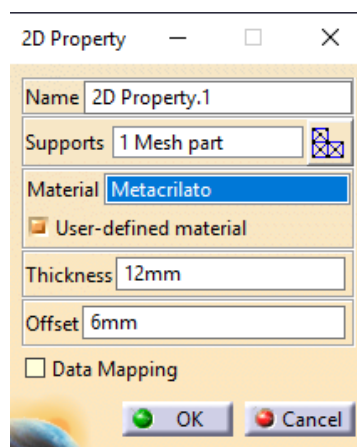



Figura 67. Propiedades del forjado base.

Las propiedades de las líneas se asocian mediante la herramienta “*1D Property*” (). A diferencia del comando utilizado para las superficies, este nos posibilita la opción de elegir la geometría de la sección, así como sus dimensiones (**Figura 68**). Con este último paso se finaliza la creación del mallado del módulo.

Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional

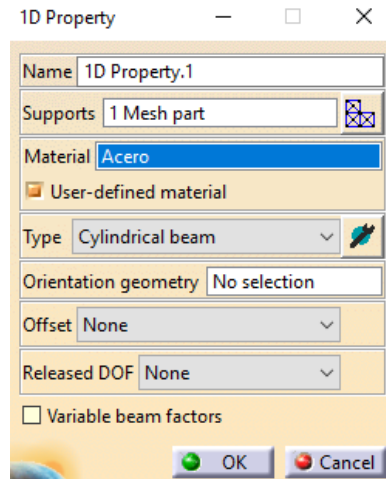



Figura 68. Propiedades de los pilares.

Las condiciones de contorno de los modelos ensayados son sencillas, debido a que la única restricción de movimiento impuesta en las estructuras es la inmovilización de la base. Para conseguir esta inmovilización se seleccionan las nueve subsuperficies de las que está dividida la superficie que actúa como forjado base y se selecciona el comando “Clamp” () para simular un empotramiento, restringiendo así cualquier movimiento posible (Figura 69).

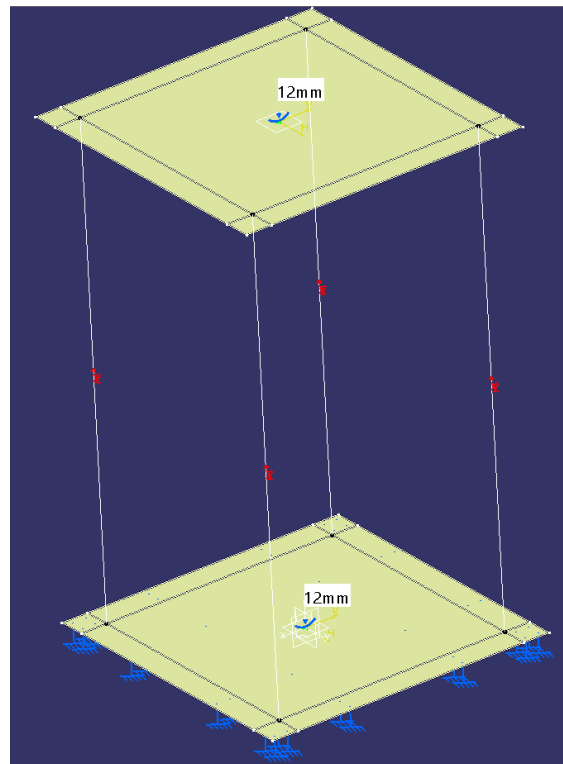


Figura 69. Empotramiento del forjado base.

Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional

El último elemento que hay que implementar en el modelo son las masas de los distintos componentes de los que la maqueta está compuesta, exceptuando la masa de los forjados y los pilares. Estas masas incluyen: la célula de carga, los distintos acelerómetros con sus soportes correspondientes, las uniones entre pilar y forjado, y las uniones entre módulos. Para situar estas masas se emplea la herramienta “Distributed mass” (). Catia no permite ubicar una masa en un punto específico, por lo que se sitúan estas masas de forma que se asemejen lo mayor posible a la situación de ensayo de la estructura (Figura 70). Estas masas están recogidas en la Tabla 1 del apartado de identificación.

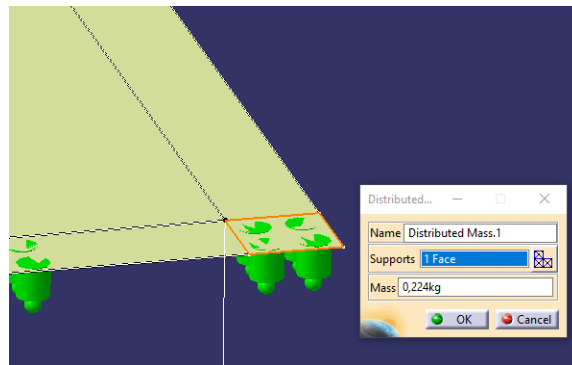


Figura 70. Fijación de las masas en el modelo.

Llegado a este punto, el modelo ya cuenta con todos los componentes necesarios para calcular las frecuencias propias para un sistema. Sin embargo, si intentamos ejecutar el programa tal y como se encuentra el modelo de la estructura, nos salta un error (Figura 71).

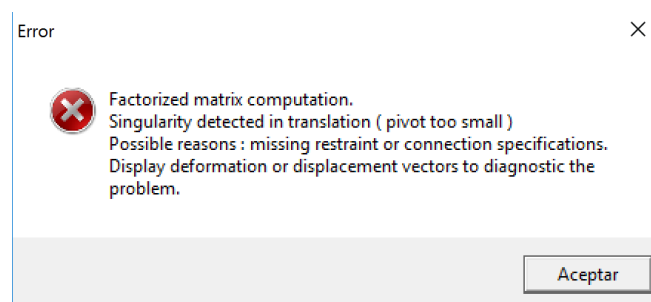



Figura 71. Error Catia.

Este error es debido a que Catia reconoce todos los elementos, pero cada uno por separado, sin saber en ningún momento que estos elementos forman un único modelo. Por este motivo hay que implementar al modelo las uniones correspondientes entre los pilares y los forjados. En primer lugar, se establece las

Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional

conexiones con la opción “*General analysis conetion*” (), seleccionando los dos elementos a unir.

Por ultimo para acabar con el modelado del módulo se le añaden las características pertinentes a la unión, es decir, escoger el tipo de unión de que se trata. Catia cuenta con múltiples opciones para implementar las propiedades a la unión, en nuestro caso, esta función se realiza mediante la herramienta “*Fastened connection property*”, situada dentro de la barra de herramientas “*Connection properties*” (Figura 72).

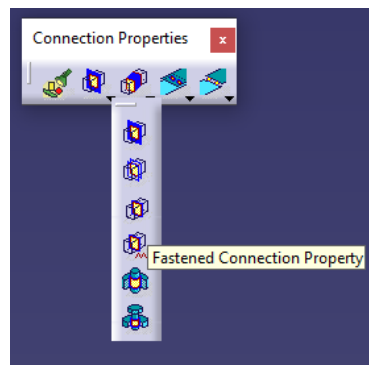


Figura 72. Panel de propiedades de la unión.

Una vez creadas las conexiones entre los elementos, se da como finalizado el proceso de modelado de un módulo (Figura 73).

Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional

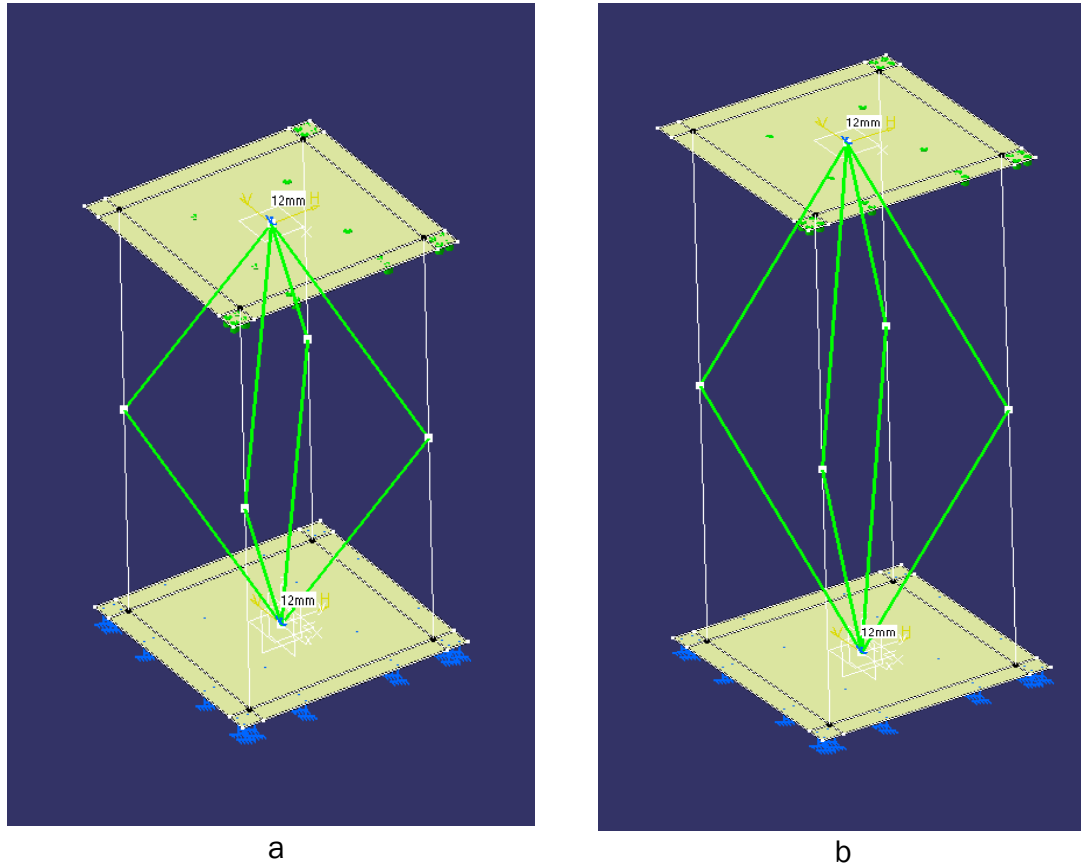


Figura 73. Modelo para el análisis. a) Módulo 500. b) Módulo 750.

Para la creación de las condiciones de análisis del conjunto de módulos (el módulo pequeño encima del módulo grande) se procede de forma similar al proceso seguido para la creación de un módulo simple. Algo importante a tener en cuenta en este modelo es que el forjado intermedio cuenta con dos placas de metacrilato en la realidad. Por ello, se le da a este el doble de espesor (Figura 74).

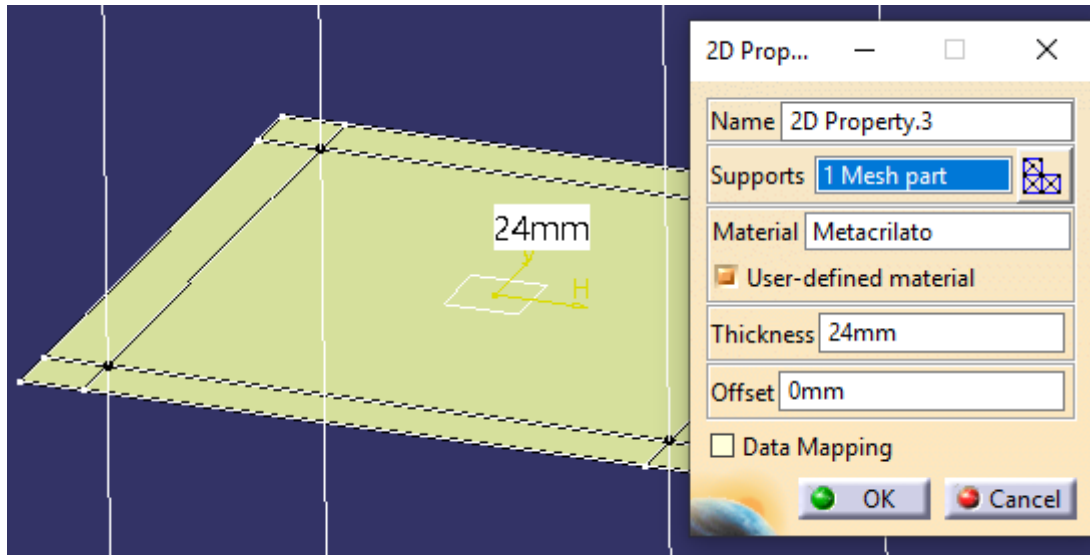


Figura 74. Espesor del forjado intermedio.

Para la finalización del modelado de todas las composiciones ensayadas en la maqueta física (Figura 75), se aplican las masas adicionales para este modelo específico. Estas masas están recogidas en la Tabla 1 .

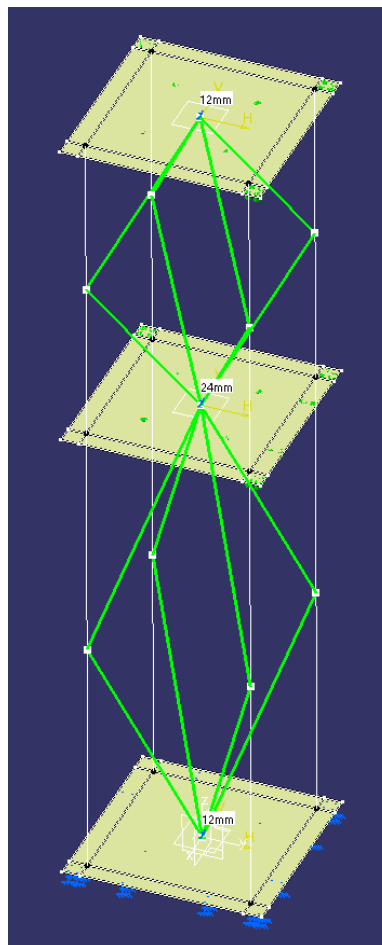





Figura 75. Modelo del conjunto de módulos (750 + 500).

4.2.3. Resultados

En este apartado se expone todo lo referente a los datos y resultados recolectados tras la realización del cálculo correspondiente a los elementos finitos de los que están compuestos cada modelo. Para la adquisición de las frecuencias y modos propios se hace uso de la herramienta “Compute” () en el módulo de análisis de frecuencias de Catia.

Las opciones de visualización existentes en el módulo de análisis de Catia son bastante escasas, lo que dificulta la representación del movimiento seguido por los modelos en imágenes. La opción escogida para esta representación es la de representar los movimientos de cada nodo de los elementos finitos del sistema en distintos colores según el valor de su desplazamiento. La escala de colores utilizada para la representación de los movimientos va desde el azul oscuro para desplazamiento nulo hasta el rojo para el desplazamiento máximo. El útil utilizado para visualizar los desplazamientos es el denominado “Displacement” (). En el caso de que se quiera ver una simulación en video de los modos seguidos por la estructura se hace uso de la herramienta “Animate” ()

Los resultados obtenidos para los distintos casos ensayados, utilizando los modelos iniciales de las distintas composiciones, no se distanciaban mucho de los resultados de la identificación realizada en el apartado 3 del este proyecto. Con el fin de obtener los modelos lo más representativos posibles de las estructuras físicas, se ha llevado a cabo una labor de calibración de los modelos iniciales creados, siguiendo un proceso lógico de variación de los distintos parámetros de cada combinación.

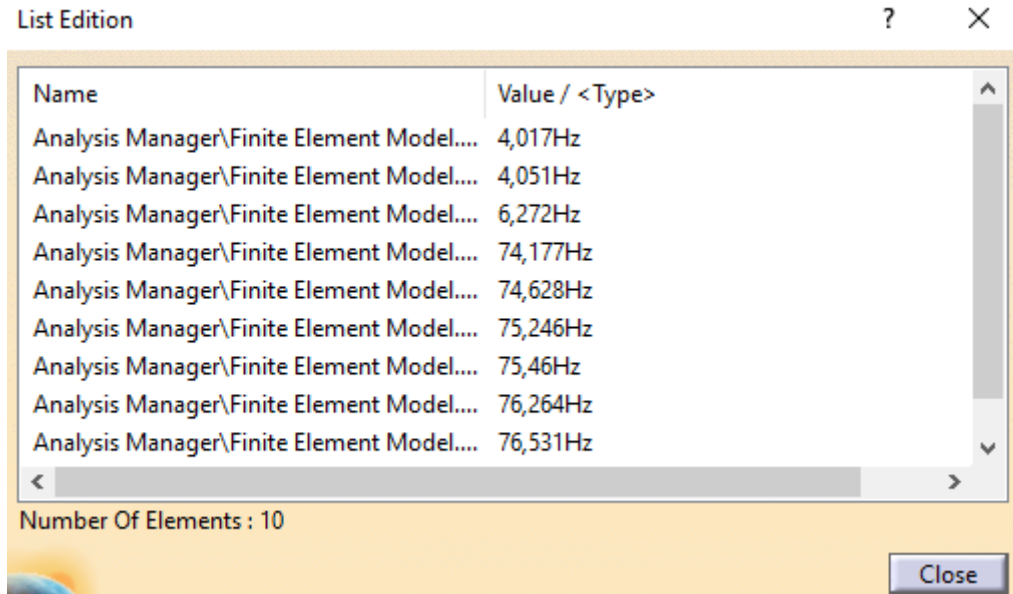
4.2.3.1. Módulos simples

Los resultados obtenidos para los módulos simples con un modelo geoméricamente fidedigno a la realidad no difieren mucho de los recogidos en el análisis modal de dichos módulos. Sin embargo, se calibran para acercarse lo mejor posible a los resultados de la experimentación.

Esta calibración se ha llevado a cabo modificando el valor de los radios de las varillas. El radio de los pilares no es constante debido a que se trata de un elemento roscado. Como se ha visto en el apartado de validación el radio influye mucho en la rigidez y por tanto en la frecuencia propia, debido a que la frecuencia depende de la inercia y esta a su vez depende del radio elevado a la cuarta potencia. Por ello, modificando

Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional

el valor del radio en milésimas de milímetro se obtienen unos valores que se asemejan mejor a los resultados buscados (Figura 76 y Figura 78).



Name	Value / <Type>
Analysis Manager\Finite Element Model....	4,017Hz
Analysis Manager\Finite Element Model....	4,051Hz
Analysis Manager\Finite Element Model....	6,272Hz
Analysis Manager\Finite Element Model....	74,177Hz
Analysis Manager\Finite Element Model....	74,628Hz
Analysis Manager\Finite Element Model....	75,246Hz
Analysis Manager\Finite Element Model....	75,46Hz
Analysis Manager\Finite Element Model....	76,264Hz
Analysis Manager\Finite Element Model....	76,531Hz

Number Of Elements : 10

Close

Figura 76. Frecuencias propias del módulo 500.

La lista de frecuencias propias calculadas por el método de elementos finitos empleado por Catia no consta con tres modos propios como obtuvimos en el análisis modal, sino que aparecen más frecuencias propias. Estas frecuencias no se tienen en cuenta ya que son frecuencias altas debidas al movimiento independiente de las varillas.

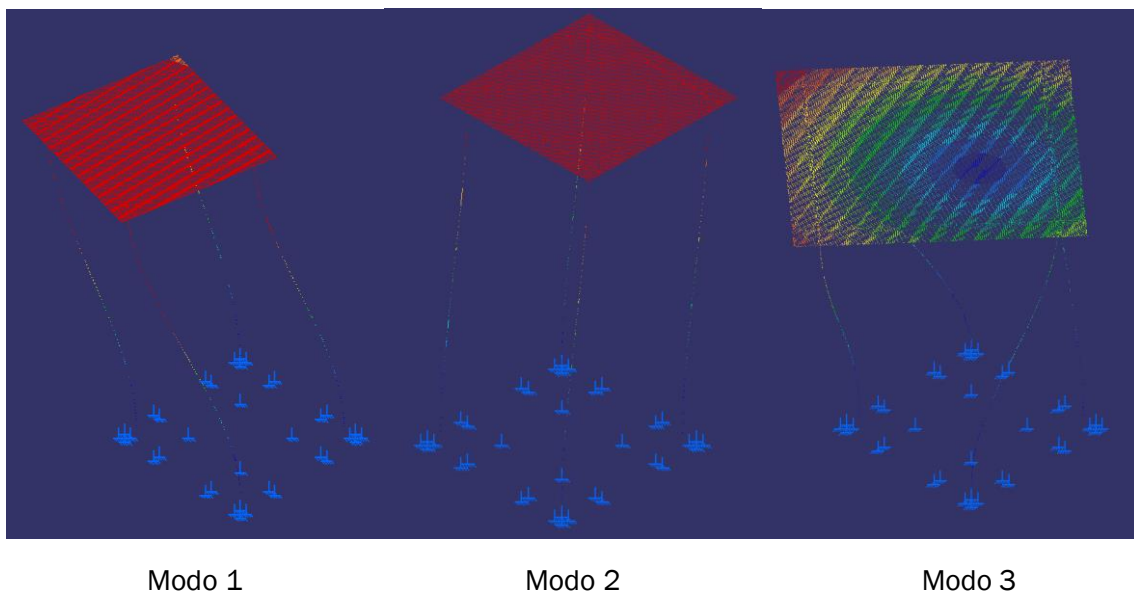


Figura 77. Modos propios del módulo 500.

Como podemos observar en la **Figura 77** y en la **Figura 79** los modos propios encontrados son tres, dos de flexión pura y uno de torsión. Si analizamos las animaciones generadas por Catia podemos observar que los dos modos de flexión son idénticos, pero en direcciones diferentes. El modo de torsión se deduce en las imágenes por los círculos concéntricos que denotan que cuanto más se alejan los nodos de los elementos finitos de este punto central el desplazamiento es mayor.

Name	Value / <Type>
Analysis Manager\Finite Element Model....	1,993Hz
Analysis Manager\Finite Element Model....	2,001Hz
Analysis Manager\Finite Element Model....	4,071Hz
Analysis Manager\Finite Element Model....	32,724Hz
Analysis Manager\Finite Element Model....	32,75Hz
Analysis Manager\Finite Element Model....	32,92Hz
Analysis Manager\Finite Element Model....	32,956Hz
Analysis Manager\Finite Element Model....	33,16Hz
Analysis Manager\Finite Element Model....	33,459Hz

Number Of Elements : 10

Close

Figura 78. Frecuencias propias del módulo 750.

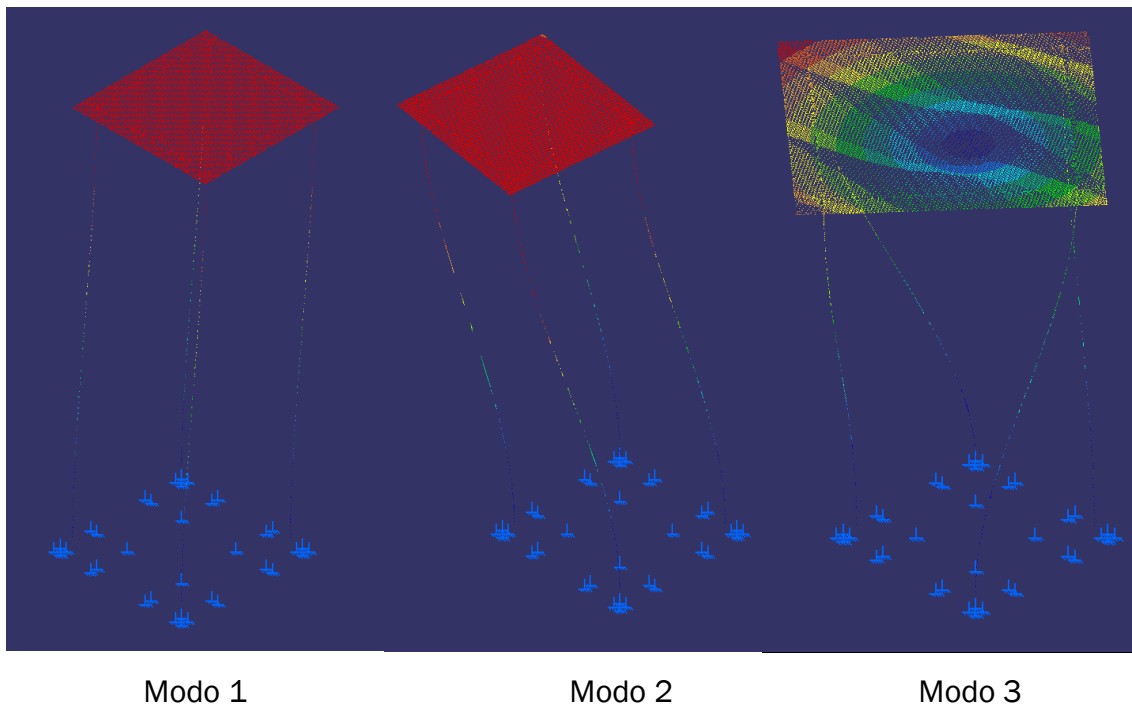


Figura 79. Modos propios del módulo 750.

4.2.3.2. Conjunto de módulos

Los resultados obtenidos del cálculo del modelo del conjunto de módulos inicial se alejan más de los valores recogidos en la identificación que los modelos de los módulos simples. Esta diferencia de los valores de la identificación y caracterización de la maqueta es debida a que se trata de una composición más compleja. La complejidad del sistema conlleva un periodo de calibración más intrincado y largo que el seguido en el caso anterior. Para esta calibración se ha modificado de forma reiterativa las masas del sistema hasta que se han conseguido llegar a frecuencias propias semejantes (**Figura 80**).

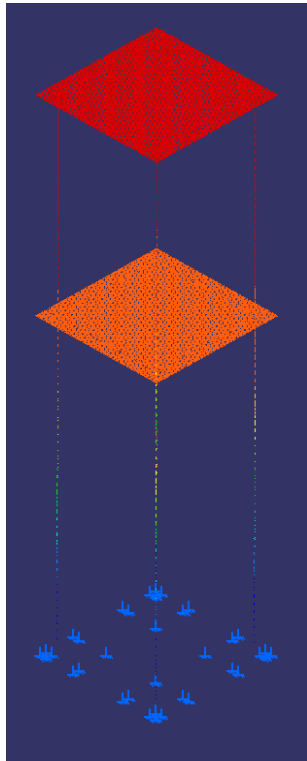
Name	Value / <Type>
Analysis Manager\Finite Element Model....	1,147Hz
Analysis Manager\Finite Element Model....	1,147Hz
Analysis Manager\Finite Element Model....	2,244Hz
Analysis Manager\Finite Element Model....	5,044Hz
Analysis Manager\Finite Element Model....	5,044Hz
Analysis Manager\Finite Element Model....	8,595Hz
Analysis Manager\Finite Element Model....	36,443Hz
Analysis Manager\Finite Element Model....	36,443Hz
Analysis Manager\Finite Element Model....	36,443Hz

Number Of Elements : 10

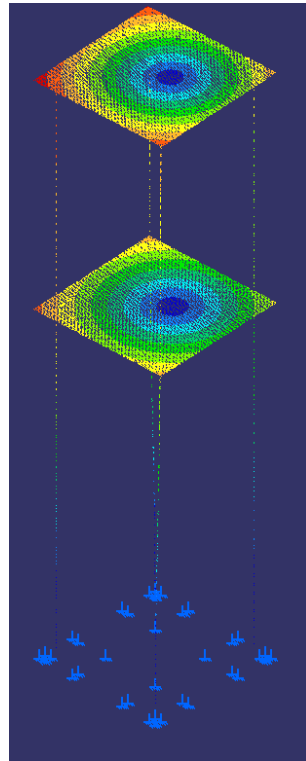
Figura 80. Frecuencias propias del conjunto de módulos (750+500).

Como se comentó en el apartado de identificación esta composición cuenta con seis modos propios, pero existen dos pares de flexión pura coincidentes. Los pares de modos de flexión coexisten en las mismas frecuencias a diferencia de lo ocurrido en el caso de los módulos simples. En los primeros dos modos de flexión el forjado superior y el forjado intermedio se mueven en el mismo sentido. Sin embargo, en los otros dos modos de flexión estos forjados se mueven en sentidos opuestos en todo momento. En los modos de torsión se encuentra la misma situación, existe un modo con giros en un mismo sentido y el otro modo girando en direcciones opuestas (**Figura 81**).

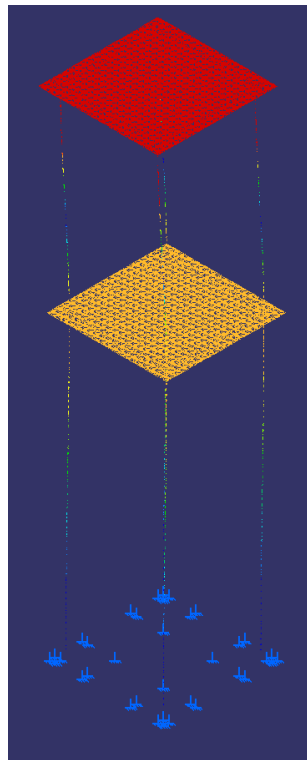
Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional



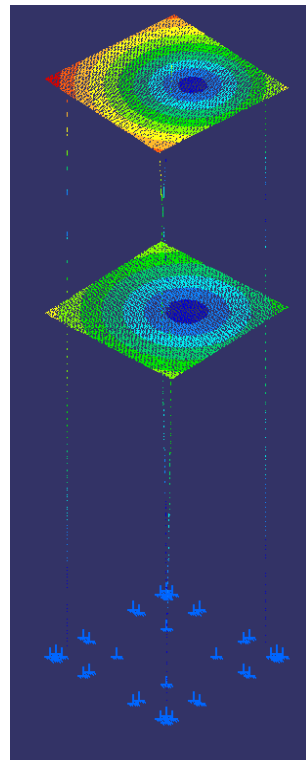
Modo 1



Modo 2



Modo 3



Modo 4

Figura 81. Modos propios del conjunto de módulos (750+500).

4.3. Otras composiciones.

Para complementar el estudio del comportamiento de la estructura se presentan en este apartado distintas composiciones interesantes: El conjunto de módulos con el módulo de 500 como base, un arriostramiento en uno de los lados y una columna suplementaria en un lado y en el centro del forjado.

4.3.1. Conjunto de módulos.

En primer lugar, se modeló el conjunto de módulos, situando el módulo de 500 como base y encima de este el módulo de 750 (**Figura 82**). El proceso seguido para la adquisición del modelo es el mismo que se llevó a cabo para el conjunto de módulos ensayado, situando en este caso los planos auxiliares en los lugares pertinentes.

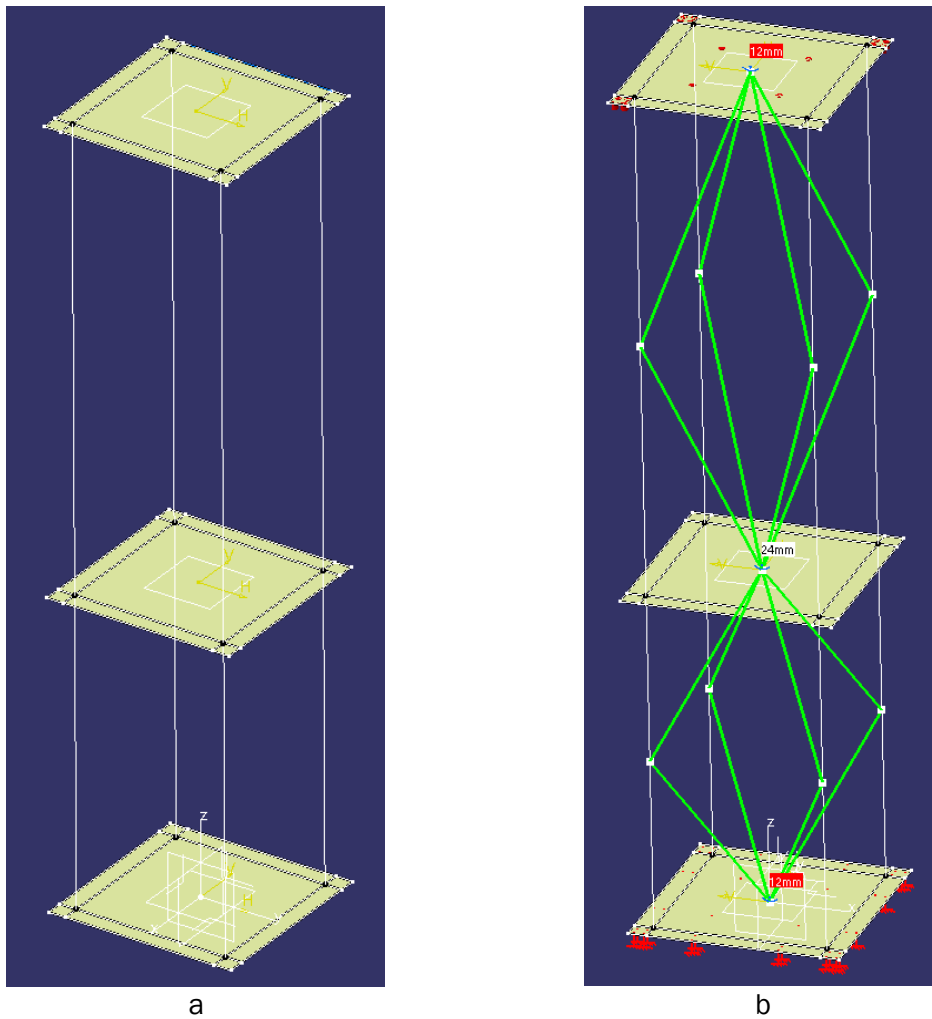
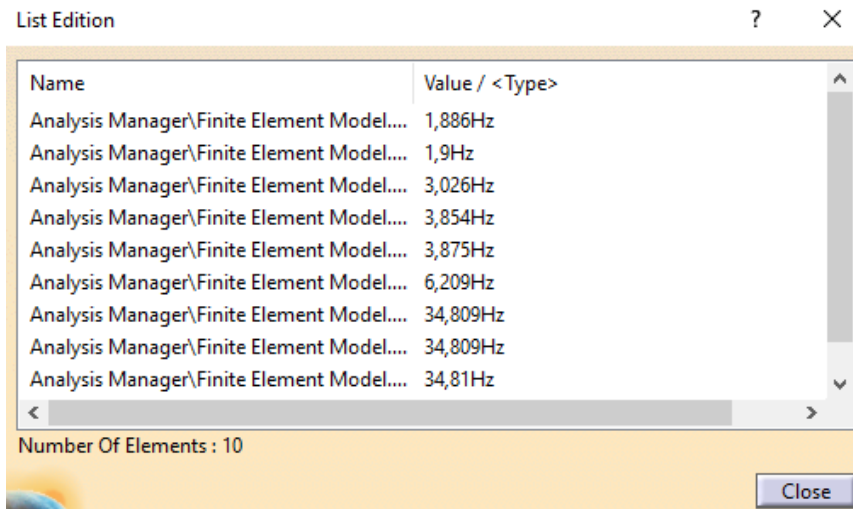


Figura 82. Conjunto de módulos (500+ 750). a) Modelo. b) Análisis.

Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional

En el conjunto de módulos los primeros tres modos (dos de flexión y uno de torsión) están relacionados con el módulo base, ya que el segundo prácticamente no interviene como se ha visto en el apartado anterior. Sin embargo, en el resto de modos ocurre todo lo contrario, las frecuencias propias vienen determinadas por la relación entre ambos forjados, debido a que se mueven en contraposición. Como se puede observar en la **Figura 83**, los primeros modos aumentan como consecuencia de tener un módulo base con una rigidez mayor a la del caso anterior. Por otro lado, el resto de frecuencias disminuyen por este mismo motivo ya que ahora la unión entre el forjado intermedio y superior es más flexible dada a la mayor longitud de las varillas del módulo de 750.



Name	Value / <Type>
Analysis Manager\Finite Element Model...	1,886Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	1,9Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	3,026Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	3,854Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	3,875Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	6,209Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	34,809Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	34,809Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	34,81Hz

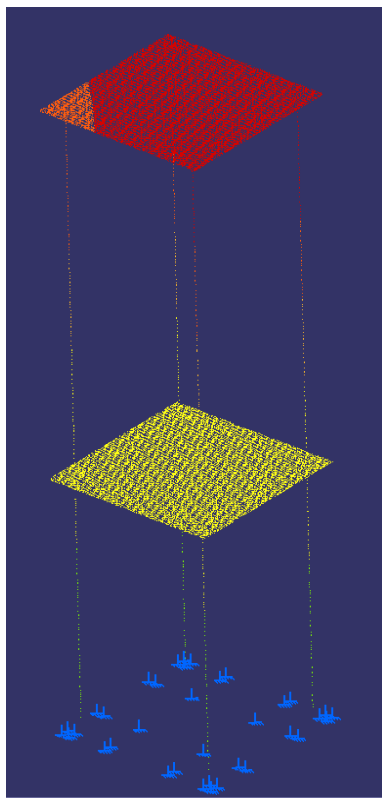
Number Of Elements : 10

Close

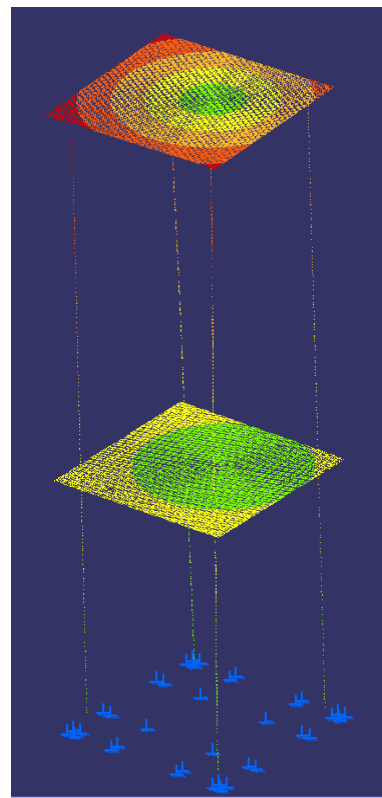
Figura 83. Frecuencias propias del conjunto de módulos (500 +750).

A continuación, se presentan los modos propios de esta composición, que pese a tener frecuencias distintas al conjunto de módulos ensayado en apartados anteriores, cuenta con los mismos modos propios (**Figura 84**).

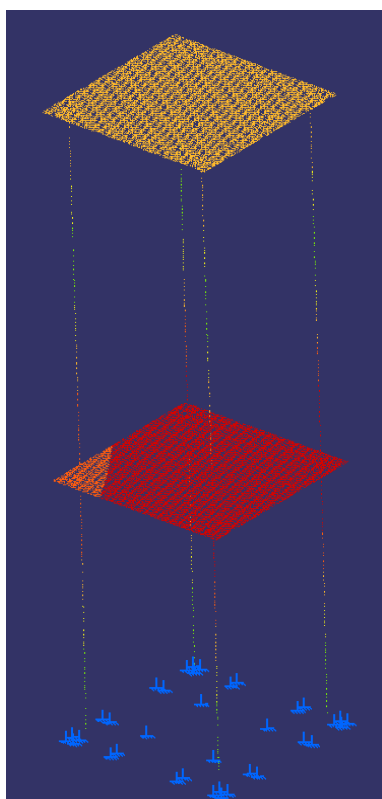
Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional



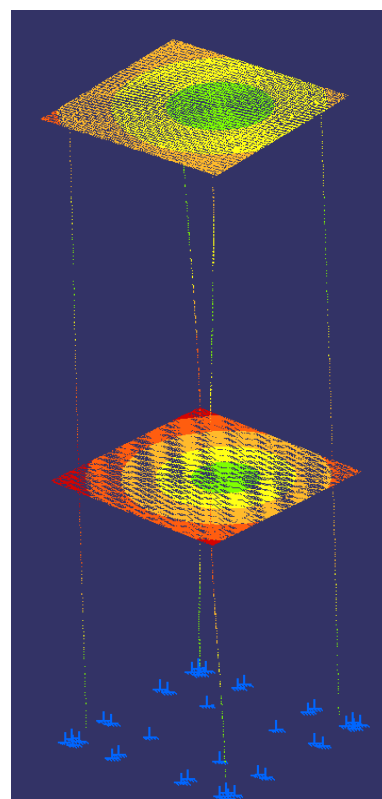
Modo 1



Modo 2



Modo 3



Modo 4

Figura 84. Modos propios del conjunto de módulos (500+750).

En los dos primeros modos el forjado intermedio y el forjado superior se mueven al unísono. Por ello, los desplazamientos máximos en flexión y torsión se encuentran en los forjados superiores, ya que el desplazamiento superior relativo se suma al del forjado intermedio, debido a que ambos módulos se mueven en el mismo sentido. En los otros dos modos ocurre lo contrario, ambos forjados cuentan con movimientos en sentidos opuestos. El movimiento relativo del forjado superior es menor dado que el valor de este se resta del movimiento seguido por el forjado intermedio.

4.3.2. Pilar extra en uno de los lados

En este modelo se ha implementado una columna a mayores al modelo del módulo de 500 (**Figura 85**). En este caso esta varilla será de diámetro doble para poder ver mejor el efecto de aplicar un elemento estructural de este estilo a uno de los lados del módulo. Como se busca la concurrencia de elementos en un punto para así tener nodos concurrentes para ambos elementos, hay que dividir los forjados. La superficie central consta ahora con 5 líneas, es decir, se ha dividido una de ellas en dos. La otra superficie que contiene el punto se divide a la mitad. Para el análisis se añaden en este caso las conexiones para este nuevo pilar.

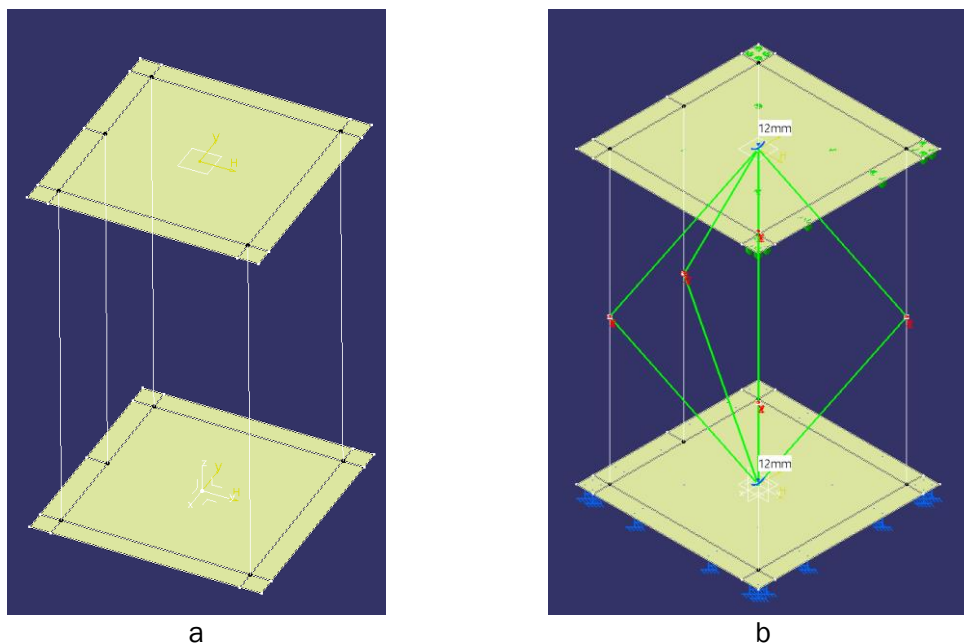
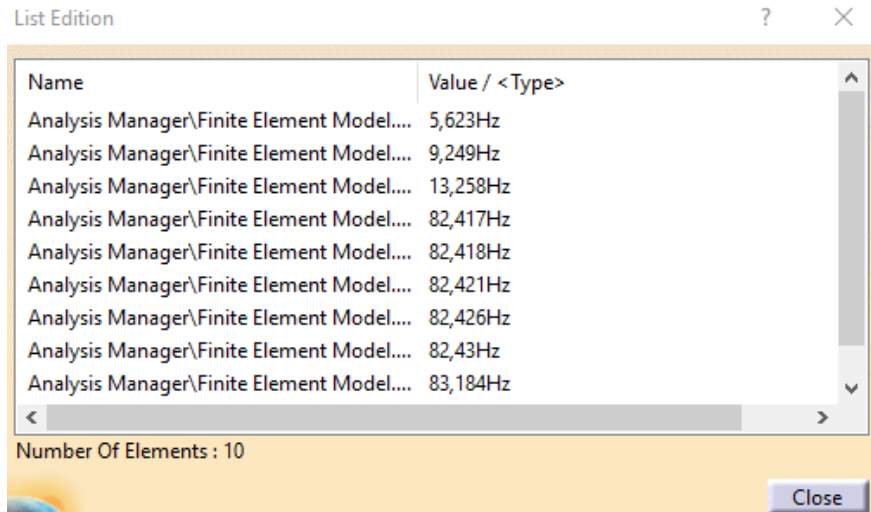


Figura 85. Columna extra. a) Modelo. b) Análisis.

Como podemos observar en la **Figura 86**, las frecuencias propias del sistema han aumentado como era de esperar, debido a que se ha implementado al modelo una varilla muy rígida.

Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional



The screenshot shows a 'List Edition' window with a table of natural frequencies. The table has two columns: 'Name' and 'Value / <Type>'. The 'Name' column contains ten entries, all starting with 'Analysis Manager\Finite Element Model...'. The 'Value / <Type>' column contains the following frequencies: 5,623Hz, 9,249Hz, 13,258Hz, 82,417Hz, 82,418Hz, 82,421Hz, 82,426Hz, 82,43Hz, and 83,184Hz. Below the table, it indicates 'Number Of Elements : 10' and a 'Close' button is visible in the bottom right corner.

Name	Value / <Type>
Analysis Manager\Finite Element Model...	5,623Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	9,249Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	13,258Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	82,417Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	82,418Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	82,421Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	82,426Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	82,43Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	83,184Hz

Figura 86. Frecuencias propias del módulo con columna extra.

Los modos propios de la estructura en este caso se han visto afectados. Sigue existiendo un modo de flexión pura y un modo de torsión como ocurría con el módulo simple. Sin embargo, el otro modo de flexión (movimiento en la dirección de no simetría) se transforma en un movimiento de torsión alrededor de la varilla implementada en el sistema (Figura 87).

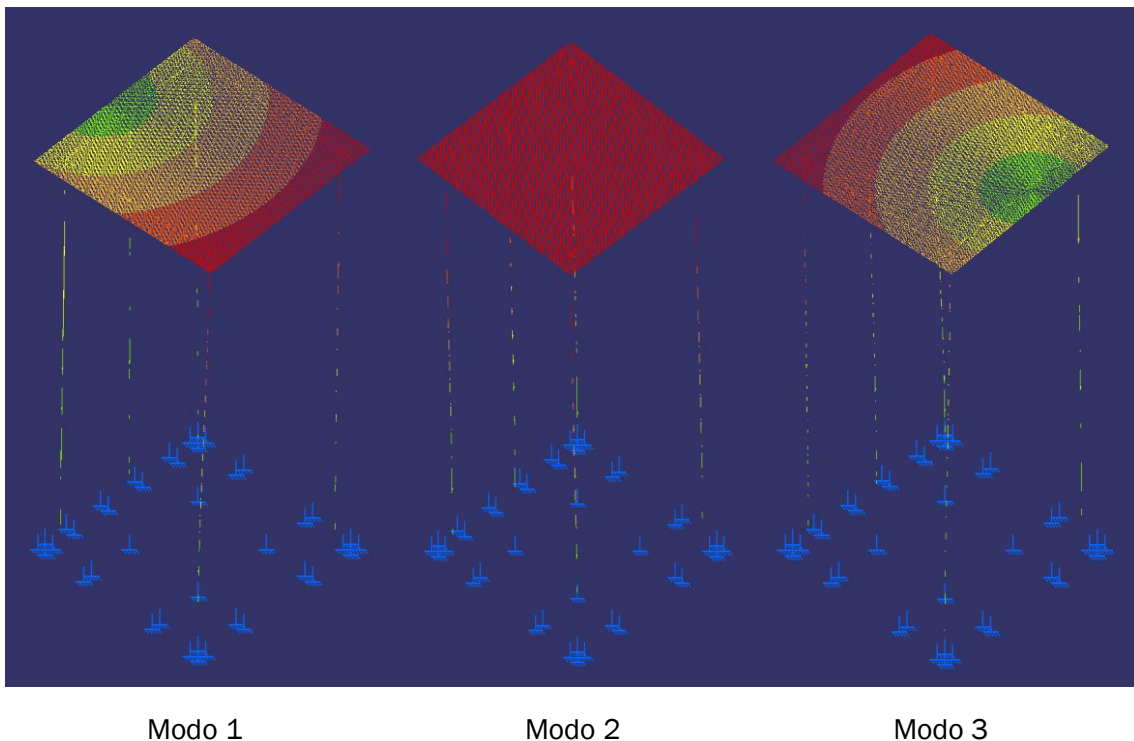


Figura 87. Modos propios del módulo con columna extra.

En el primer modo existen desplazamientos concéntricos como denotan las superficies coloreadas de distinto color. La deformada modal de este modo es aquella en la que el forjado superior rota alrededor de la columna extra implementada. El segundo modo es un movimiento de flexión pura donde el forjado se desplaza en su conjunto en la misma magnitud para todos los puntos. El último modo es el movimiento de torsión presente en el módulo simple. Sin embargo, el centro de rotación se desplaza al extremo como consecuencia de la columna extra.

4.3.3. Pilar central extra

En este modelo se ha implementado un pilar extra, como ya ocurría en el caso anterior. En esta ocasión este pilar es idéntico al resto que encontramos en la estructura y está situado en el centro del modelo (**Figura 88**). Para la implementación de este pilar extra se divide la superficie central del forjado en cuatro subsuperficies simétricas. El pilar central concurre en un punto donde se encuentran las esquinas de las cuatro nuevas subsuperficies. Por ello, se dota al modelo de las conexiones entre estos elementos.

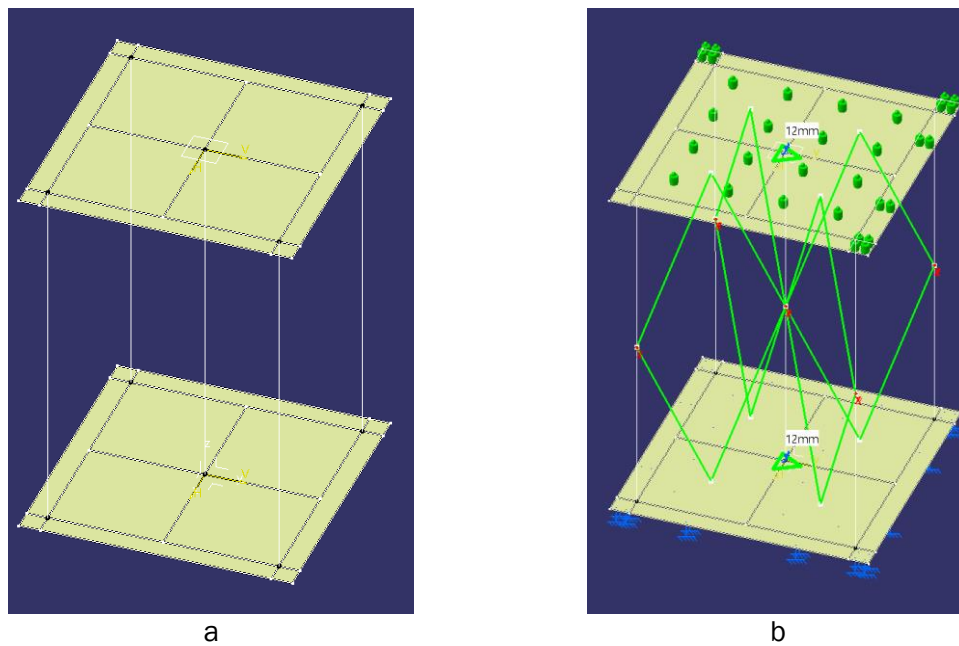
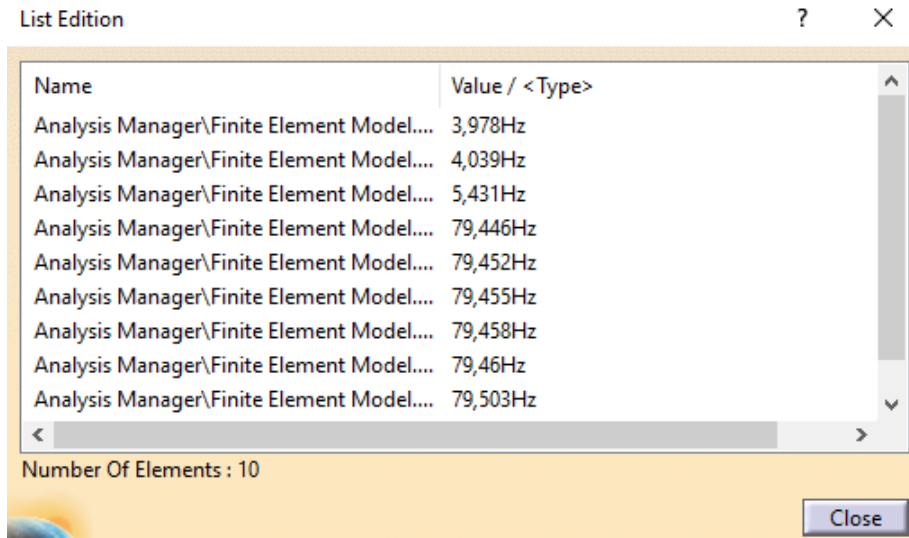


Figura 88. Columna central. a) Modelo. b) Análisis.

Las frecuencias propias de flexión en esta composición apenas se ven afectadas por la implementación de esta varilla, debido a que la rigidez aportada a este movimiento es prácticamente nula. Sin embargo, la frecuencia propia de torsión disminuye notablemente (**Figura 89**).

Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional



Name	Value / <Type>
Analysis Manager\Finite Element Model....	3,978Hz
Analysis Manager\Finite Element Model....	4,039Hz
Analysis Manager\Finite Element Model....	5,431Hz
Analysis Manager\Finite Element Model....	79,446Hz
Analysis Manager\Finite Element Model....	79,452Hz
Analysis Manager\Finite Element Model....	79,455Hz
Analysis Manager\Finite Element Model....	79,458Hz
Analysis Manager\Finite Element Model....	79,46Hz
Analysis Manager\Finite Element Model....	79,503Hz

Number Of Elements : 10

Close

Figura 89. Frecuencias propias del módulo con columna central.

Los modos propios del modelo siguen siendo los mismos (en el primer modo aparece una pequeña componente torsional despreciable). El modo de torsión no es el mismo al que podemos encontrar en el resto de modelos estudiados, debido a que este movimiento supondría retorcer la varilla. Este suceso requiere una energía enorme en comparación con la necesaria para el resto de situaciones. Por ello, la frecuencia propia adjunta a este hecho es mucho mayor. El movimiento de torsión para este caso es aquel en el que la varilla central no se retuerce, sino que gira alrededor del punto central (Figura 90).

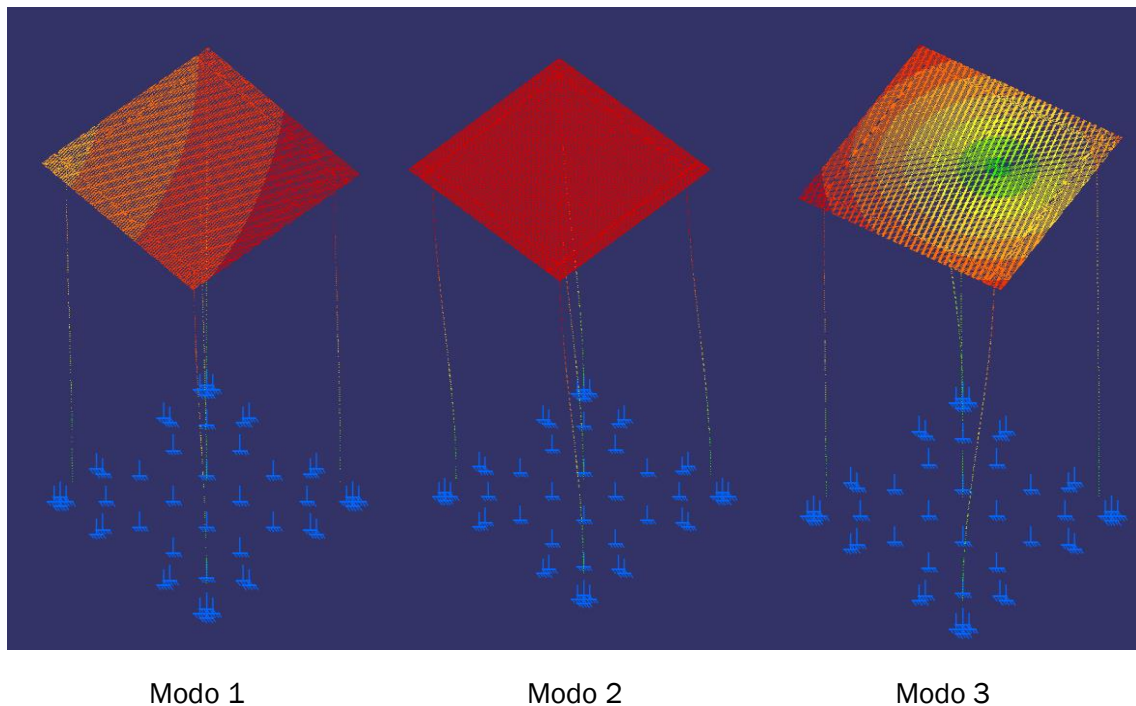


Figura 90. Modos propios del módulo con columna central.

Los dos primeros modos de flexión no se ven prácticamente afectados, debido a que la columna central no aporta nada a estos movimientos. Sin embargo, elimina el modo de torsión que se encontraba en el módulo simple, apareciendo otro en el que la varilla central gira alrededor del centro del forjado superior.

4.3.4. Arriostramiento en uno de los lados

El arriostramiento aplicado al modelo consta de dos varillas con el mismo diámetro que el resto de varillas del sistema. Este arriostramiento es aplicado en un único lado del módulo (**Figura 91**). Para la ejecución de este modelo simplemente se crean líneas uniendo los puntos existentes en los extremos de los pilares, con las conexiones correspondientes a las uniones entre el arriostramiento y los forjados.

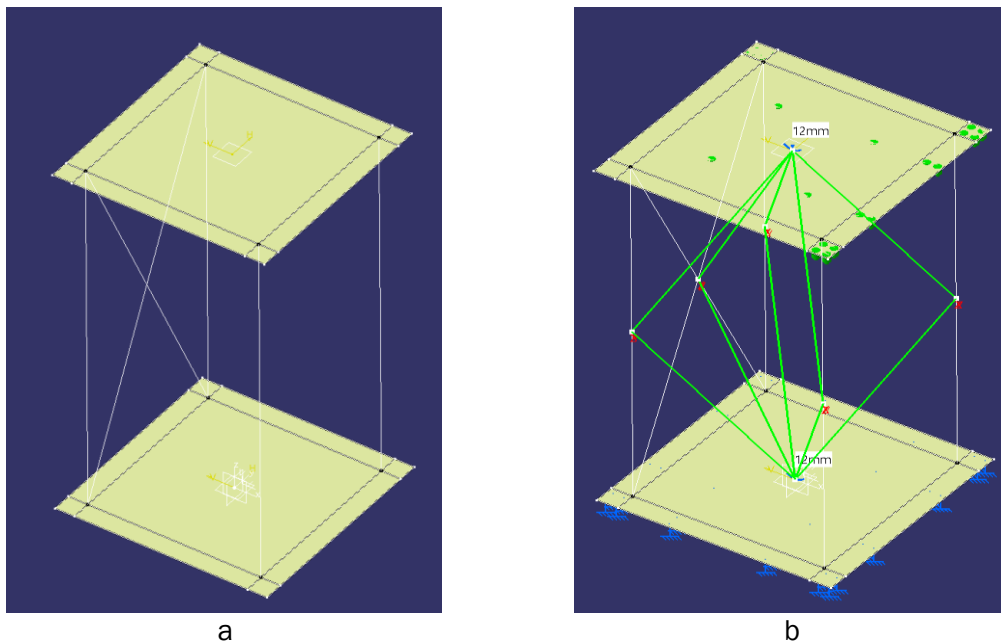


Figura 91. Arriostramiento. a) Modelo. b) Análisis.

El arriostramiento del modelo transforma al módulo en un conjunto estructural mucho más rígido. Esta rigidez hace desaparecer uno de los modos propios del sistema (**Figura 92**).

Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional

List Edition

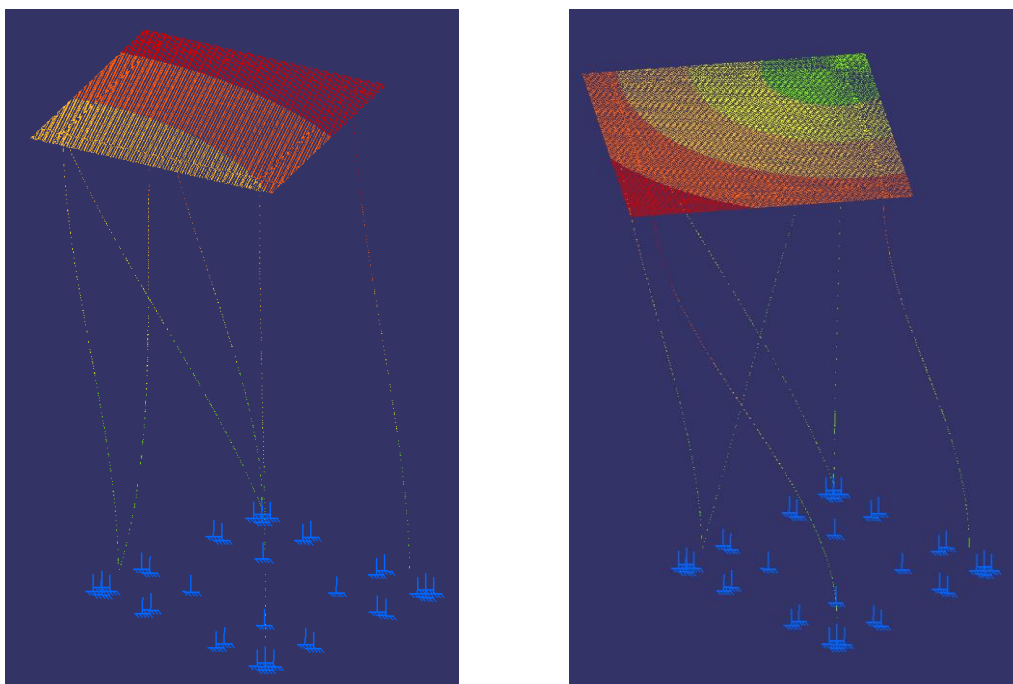
Name	Value / <Type>
Analysis Manager\Finite Element Model...	4,58Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	5,032Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	52,622Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	57,799Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	58,691Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	62,837Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	78,313Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	78,515Hz
Analysis Manager\Finite Element Model...	78,517Hz

Number Of Elements : 10

Close

Figura 92. Frecuencias propias del módulo con arriostramiento.

Los modos propios del sistema son dos, el de flexión moviéndose en el eje de simetría (aparece una pequeña componente torsional despreciable) y uno de torsión, desplazado su centro al extremo debido a la rigidización de un único lado (Figura 93).



Modo 1

Modo 2

Figura 93. Modos propios del módulo con arriostramiento.

Prototipado de una maqueta de edificio multidireccional

El arriostramiento implementado en el modelo aporta una gran rigidez en el lado donde está colocado. Por ello, los desplazamientos entre los puntos que unen el arriostramiento se dificultan, debido a que este desplazamiento requiere de la compresión o tracción de las varillas. Los dos modos que aparecen son movimientos donde el arriostramiento se flexiona.

5. Conclusiones y líneas futuras

Para concluir el Trabajo de Fin de Grado, en este capítulo se exponen las conclusiones obtenidas de los diferentes aspectos que se tratan en este proyecto. Finalmente, se dedica un apartado en el que se lleva a cabo una breve descripción de posibles mejoras e implementaciones que podrían ser de gran utilidad en futuras ocasiones.

5.1. Conclusiones

Con el fin de dar como válida la finalización del proyecto se analizan los objetivos impuestos al comienzo del desarrollo del Trabajo de Fin de Grado.

5.1.1. Cumplimiento de objetivos técnicos.

En el apartado de introducción se presentaron los objetivos técnicos siguientes: la disposición de la maqueta para uso del departamento de estructuras, la implementación del proceso seguido en la caracterización e identificación de una estructura y la creación y calibración de un modelo computacional.

El proceso de prototipado y montaje de la maqueta planteó diversos inconvenientes. Estos problemas se solucionaron en su debido momento, consiguiendo así llegar a una maqueta modular de un edificio multidireccional representativa de una estructura real a escala.

Una vez disponible el modelo final de la maqueta se llevó a cabo la identificación de esta. En esta identificación se siguió paso a paso el proceso real de caracterización de una estructura. Este proceso conlleva la instalación en la estructura de los distintos dispositivos de detección de fuerzas de excitación y movimiento seguido por los distintos puntos requeridos. A continuación, se conectan estos dispositivos a una unidad de recolección de los datos. La identificación de la estructura requiere un software específico, se modela dicha estructura implementando en este modelo los puntos donde se recogen los datos por los distintos sensores implantados. Por último, se conecta el sistema de recolección de datos al ordenador y se realizan los ensayos pertinentes. El software se encarga de aplicar un posprocesado para la determinación de los distintos parámetros característicos del sistema. Sin embargo, aunque el proceso es el mismo, los elementos empleados en una estructura real son mucho más numerosos y normalmente se hace uso de un “*shaker*” que excita con fuerzas variables la estructura a estudiar, en vez de fuerzas constantes y en un instante de tiempo determinado como es el caso que ha seguido en la experimentación llevada a cabo.

Por último, se dedicó el resto del desarrollo del trabajo al aprendizaje y uso del módulo de análisis de Catia. La variedad de softwares disponibles para el estudio de la maqueta planteó varias opciones para el desarrollo de este modelado. Sin embargo, se decidió implementar como otra opción para un futuro el programa Catia a los softwares utilizados en el departamento de estructuras. Como consecuencia de no haber trabajado previamente con este software en el laboratorio, fue necesario un periodo de creación de modelos simples para la validación de Catia como software empleado posteriormente en el modelado de las distintas composiciones. Los resultados obtenidos en esta validación fueron lo bastante fidedignos como para continuar usando el software en el Trabajo de Fin de Grado.

Estructura	Modos	Frecuencias Propias Reales (Hz)	Frecuencias Propias Modelo Computacional (Hz)	Error (%)
Módulo Pequeño	Modo 1 (flexión)	3,99	4,01	0,49
	Modo2 (flexión)	4,01	4,05	0,98
	Modo 3 (torsión)	6,34	6,27	1,11
Módulo Grande	Modo 1 (flexión)	2,02	1,99	1,50
	Modo2 (flexión)	2,04	2,01	1,49
	Modo 3 (torsión)	3,95	4,07	2,9
Conjunto de Módulos	Modo1 (flexión)	1,1	1,14	3,50
	Modo2 (torsión)	2,3	2,24	2,67
	Modo3 (flexión)	5,2	5,04	3,17
	Modo4 (torsión)	8,6	8,59	0,11

Tabla 7. Comparación de resultados.

Como se puede observar en la tabla anterior los errores cometidos tras la creación y calibración de los modelos son lo suficientemente bajos como para dar por valido el modelado seguido. Estos errores pueden tener su origen en multitud de factores: ruido eléctrico a la hora de hacer la experimentación, incertidumbre de medida de los sensores utilizados, esfuerzos internos en los componentes de la maqueta debidos a la manipulación de estos, movimientos de la base, pequeños errores de montaje, simplificaciones del modelo computacional como por ejemplo las rigideces de las uniones, etc.

Una vez expuestas las diferentes etapas llevadas a cabo en el Trabajo de Fin de Grado daremos como cumplidos todos los objetivos técnicos. Sin embargo, el módulo de análisis de Catia esta creado en un principio para el análisis de volúmenes de sólidos. Debido a que la maqueta no era un único volumen, sino que estaba compuesta de multitud de elementos de distinto carácter, superficies y líneas, supuso un trabajo dificultoso. El procedimiento seguido para el estudio de múltiples elementos es un proceso tedioso, donde se pueden cometer multitud de errores a la hora de imponer las condiciones de estudio. Por todo ello se desechó la idea de utilizar este software para futuros proyectos.

5.1.2. Cumplimiento de objetivos complementarios.

Durante el desarrollo del Trabajo de Fin de Grado se han planteado diferentes objetivos complementarios: presupuestos, parámetros característicos, plazos, montaje y disponibilidad de materiales.

El montaje es rápido y sencillo ya que este requiere unos pocos minutos. Las opciones escogidas para la fabricación de la estructura supusieron costes asumibles para el departamento. Se ha realizado a tiempo todos los apartados del Trabajo de Fin de Grado, por lo que se han cumplido los plazos impuestos desde un principio. El mecanizado de la maqueta realizado en la escuela es nulo. Las frecuencias propias del sistema son lo suficientemente bajas para ver a simple vista el comportamiento de la maqueta. Por todas estas razones descritas, podemos asegurar que se cumplen los objetivos suplementarios buscados durante el desarrollo del trabajo.

5.2. Líneas futuras

Para finalizar el Trabajo de Fin de Grado se exponen en este apartado posibles mejoras o implementaciones de este que se pueden llevar a cabo en un futuro.

Como idea de implementación para un futuro Trabajo de Fin de Grado se propone un TMD (*Tuned Mass Damper*) o amortiguador de masa sincronizado, que se compone de un dispositivo de amortiguación de las oscilaciones de una estructura gracias al uso de una masa unida a la estructura mediante una serie de resortes para oponerse al movimiento seguido por la maqueta.

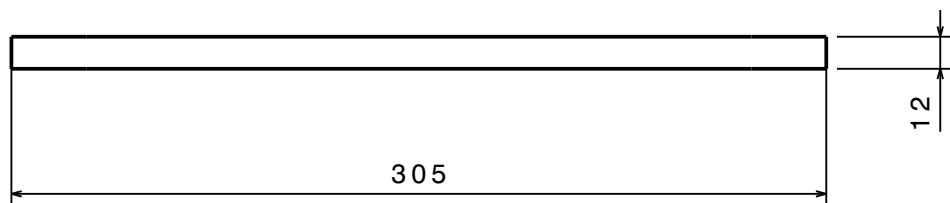
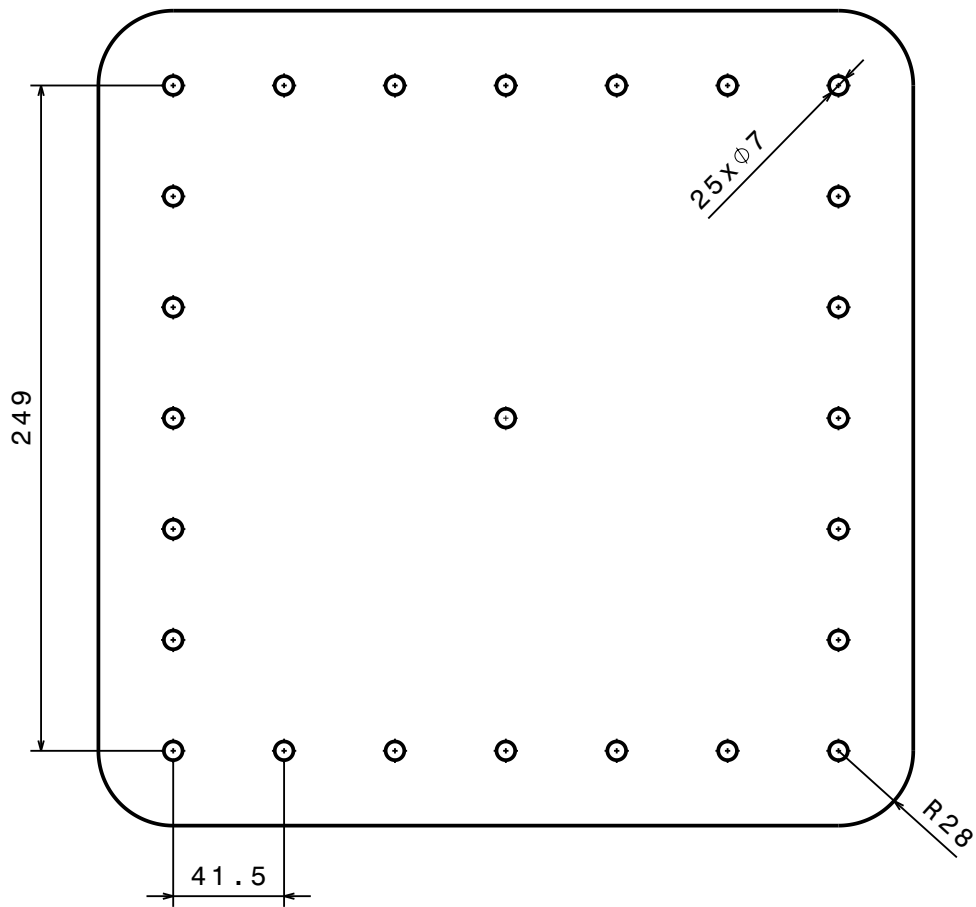
La maqueta prototipada consta con frecuencias propias bajas, pero una posible mejora consistiría en buscar algún material más flexible, como pueden ser varillas de fibra de vidrio, o incluso modificar la composición de la estructura para conseguir valores de frecuencias aún más bajos. Por otro lado, se pueden aplicar a la maqueta elementos estructurales suplementarios, para ampliar así las posibilidades de estudio. Un ejemplo de estos elementos son los arriostramientos de la estructura, tal y como se comentó en el apartado de prototipado.

Referencias

- [1] J. L. G. García, «Diseño, construcción y caracterización de una maqueta de edificio multiplanta para prácticas de vibraciones,» Valladolid, 2016.
- [2] N. Wongprasert, S. Bennion y . J. Collins, «SHAKING TABLE DEMONSTRATION OF DYNAMIC RESPONSE OF BASE-ISOLATED BUILDINGS,» Washington.
- [3] J. D. Bachiller, «Análisis de uso de Catia basado en FEM para simular problemas de comportamiento mecánico,» Valladolid, 2018.
- [4] J. P. Delgado, «Manual de Catia V5 para análisis estructural estático y aplicaciones prácticas,» Sevilla, 2015.
- [5] D. R. Guerra, «ANÁLISIS DEL USO DE CATIA V5 PARA SIMULAR PROBLEMAS DE COMPORTAMIENTO MECÁNICO,» Valladolid, 2017.

Anexos

Planos



FECHA

11/05/19

Forjado

Tamaño

A4

Escala

1:2